

ŠUMARSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

OBLIKOVANJE PROIZVODA OD DRVA

VALENTINO SLIVAR

**UTJECAJ TEMPERATURE ZAVARIVANJA NA ČVRSTOĆU
ROTACIJSKI ZAVARENOG SPOJA**

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, 2017.

ŠUMARSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
DRVNOTEHNOLOŠKI ODSJEK

UTJECAJ TEMPERATURE ZAVARIVANJA NA ČVRSTOĆU
ROTACIJSKI ZAVARENOG SPOJA

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij:	Oblikovanje proizvoda od drva
Predmet:	Konstrukcije proizvoda od drva III
Ispitno povjerenstvo:	1. Doc. dr. sc. Ivica Župčić 2. Prof. dr. sc. Ivica Grbac 3. Dr. sc. Kristijan Radmanović
Student:	Valentino Slivar
JMBAG:	0068217772
Broj indeksa:	724/2015
Datum odobrenja teme:	29. 03. 2017.
Datum predaje rada:	01.09. 2017.
Datum obrane rada:	22. 09. 2017.

Zagreb, rujan, 2017.

DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Naslov	Utjecaj temperature zavarivanja na čvrstoću rotacijski zavarenog spoja
Autor	Valentino Slivar
Adresa autora	Pasanska Gorica 32, 49245 Gornja Stubica
Mjesto izrade	Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	Doc. dr. sc. Ivica Župčić
Izradu rada pomogao	Ivan Žulj, mag. ing. techn. lign. Dr. sc. Kristijan Radmanović
Godina objave	2017.
Obujam	Broj stranica: 63 Broj tablica: 25 Broj slika: 37 Broj grafikona: 8 Broj navoda iz literature: 25
Ključne riječi	Rotacijsko zavarivanje, bukva (<i>Fagus Sylvatica</i> L.) i bor (<i>Pinus Sylvestris</i> L.), izvlačna sila, čvrstoća zavarenog spoja, temperatura zavarivanja, frekvencija zavarivanja, dubina zavarivanja
Sažetak	<p>U radu je istraživao utjecaj frekvencije vrtnje (865 i 1520 min^{-1}) i dubina zavarivanja (20 i 25 mm) na temperaturu u rotacijski zavarenom spoju. Smjer zavarivanja bio je okomito na smjer vlaknaca uz konstantno trajanje zavarivanja. Temperatura se mjerila pomoću mjernih sondi postavljenih okomito na smjer provrta za moždanik. Pozicija mjernih sondi definirana je u ovom istraživanju. Bukov moždanik zavarivao se u podlogu izrađenu iz bukovine i borovine. Proučena su dosadašnja istraživanja na</p>

spomenutu temu, te izvršena usporedba s vlastitim rezultatima istraživanja.

Statističkom analizom utvrđeno je kako uzorci borovine zavareni većom frekvencijom vrtnje (1520 min^{-1}) postižu prosječno veće iznose izvlačne sile, dok kod bukovine između skupina (kombinacija različitih frekvencija vrtnje i dubine zavarivanja) ne postoji statistički značajne razlike. Temperatura zavarivanja ovisi o frekvenciji vrtnje, time veće iznose temperature postižu uzorci zavareni frekvencijom 1520 min^{-1} . Utvrđeno je kako ne postoji statistički značajna razlika između uzoraka iste frekvencije vrtnje bez obzira na dubinu. Međutim, postoji statistički značajna razlika između uzoraka različite frekvencije vrtnje.

Izvedena je jednadžba prijenosa topline koja nam prikazuje faktore koji utječu na izmjerenu temperaturu, a ona ovisi o vremenu, intenzitetu izvora, te o koeficijentu toplinske vodljivosti materijala.

KEYWORD DOCUMENTATION


Title	Influence of temperature on strength of rotation welded joint
Author	Valentino Slivar
Address of the author	Pasanska Gorica 32, 49245 Gornja Stubica
Source	University of Zagreb, Faculty of Forestry
Publication type	Bachelor's (B.Sc.) thesis
Mentor	Doc. dr. sc. Ivica Župčić
In making work helped	Mag. ing. techn. lign. Ivan Žulj Dr. sc. Kristijan Radmanović
Publication Year	2017.
Volume	Number of pages: 63 Number of tables: 25 Number of images: 37 Number of charts: 8 The number of citations from the literature: 25
Keywords	Rotary welding, beech wood (<i>Fagus Sylvatica</i> L.), pine (<i>Pinus Sylvestris</i> L.), pulling force, strength of welded joint, welding temperature, welding frequency, welding frequency depth
Abstrac	<p>The paper will investigate the influence of the rotation frequency (865 and 1520 rpm) and the welding depth (20 and 25 mm) at the temperature in the rotary welded joint. The welding direction is perpendicular to the direction of the fibers with constant welding time. The temperature is measured by means of measuring probes set vertically on the rotor bore direction. The position of the measuring probes is defined in this study. Beech dowel will be welded in substrate made from beech and pine.</p>

KEYWORD DOCUMENTATION

Previous research on the topic above has been studied and a comparison with their own research results has been carried out.

Statistical analysis showed that pine samples welded at a higher rotation frequency (1520 rpm) achieve average higher amounts of pulling force, while there are no statistically significant differences between beech groups. The welding temperature depends on the frequency of rotation, hence the higher temperatures reach the welded frequency of 1520 rpm. It was found that there is no statistically significant difference between samples of the same frequency regardless of depth. However, there is a statistically significant difference between different frequency patterns.

A heat transfer equation shows the factors affecting on the measured temperature, depending on time, intensity of the source and the coefficient of thermal conductivity of the material.

	IZJAVA O IZVORNOSTI RADA	OB ŠF 05 07
		Revizija: 1
		Datum: 28.6.2017.

„Izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

vlastoručni potpis

Valentino Slivar

U Zagrebu, 01.09.2017.

Sadržaj

POPIS SLIKA.....	IX
POPIS TABLICA	X
POPIS GRAFIKONA	XI
PREDGOVOR.....	XII
1. UVOD	1
2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA	2
2.1. Zavarivanje drva.....	2
2.1.1. Rotacijsko zavarivanje drva.....	2
2.1.2. Vibracijsko zavarivanje.....	7
2.2. Svojstva običnog bora (<i>Pinus Sylvestris</i> L.).....	8
2.3. Svojstva bukovine (<i>Fagus Sylvatica</i> L.).....	10
3. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA.....	12
3.1. Izbor korištenih materijala.....	12
3.1.1. Izbor masivnog drva	12
3.2. Priprema uzoraka za zavarivanje okomito na smjer vlaknaca	12
3.2.1. Određivanje početnog sadržaja vode u uzorcima	12
3.2.2. Priprema uzoraka	13
3.2.3. Priprema moždanika	16
3.3. Izrada ispitnih proba	17
3.4. Način ispitivanja	19
4. ANALIZA I PRIKAZ ISTRAŽIVANJA.....	21
4.1.1. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima borovine kod 865 min ⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 20 mm dubine	23
4.1.2. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima borovine kod 865 min ⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 25 mm dubine	24
4.1.3. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima borovine kod 1520 min ⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 20 mm dubine	26
4.1.4. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima borovine kod 1520 min ⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 25 mm dubine	27
4.1.5. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima bukovine kod 865 min ⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 20 mm dubine	29
4.1.6. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima bukovine kod 865 min ⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 25 mm dubine	31

4.1.7. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima bukovine kod 1520 min ⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 20 mm dubine	33
4.1.8. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima bukovine kod 1520 min ⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 25 mm dubine	35
4.2. Usporedba rezultata izvlačne sile uzoraka borovine	37
4.3. Usporedba rezultata iznosa temperature zavarivanja uzoraka borovine	39
4.4. Usporedba rezultata izvlačne sile uzoraka bukovine	41
4.5. Usporedba rezultata iznosa temperature zavarivanja uzoraka bukovine	42
5. TEORIJSKO ISTRAŽIVANJE PRIJENOSA TOPLINE	44
6. ZAKLJUČAK	52
7. PRILOZI	54
7.1. Usporedba rezultata izvlačne sile uzoraka borovine (statistička obrada)	54
7.2. Usporedba rezultata iznosa temperature zavarivanja uzoraka borovine (statistička obrada)	56
7.3. Usporedba rezultata izvlačne sile uzoraka bukovine (statistička obrada)	58
7.4. Usporedba rezultata iznosa temperature zavarivanja uzoraka bukovine (statistička obrada)	60
LITERATURA	62

POPIS SLIKA

<i>Slika 1 Tangentni presjek borovine (http://www.wood-database.com/european-beech/ , 11.07.2017.)</i>	9
<i>Slika 2 Poprečni presjek bukovine (http://www.wood-database.com/european-beech/ , 11.07.2017.)</i>	10
<i>Slika 3 Tangentni presjek bukovine (http://www.wood-database.com/european-beech/ , 11.07.2017.)</i>	10
<i>Slika 4. Radijalno - tangentna tekstura</i>	14
<i>Slika 5. Shematski prikaz ispitnog uzoraka borovine za zavarivanje moždanika</i>	14
<i>Slika 6. Ispitni uzorak borovine</i>	14
<i>Slika 7. Shematski prikaz ispitnog uzoraka bukovine</i>	15
<i>Slika 8. Ispitni uzorak bukovine</i>	15
<i>Slika 9. Pozicija provrta za ispitne sonde</i>	15
<i>Slika 10. Bušenje provrta za moždanike na uzorku borovine</i>	16
<i>Slika 11. Bušenje provrta za mjerne sonde na uzorku borovine</i>	16
<i>Slika 12. Dimenzija moždanika potrebnog za ispitivanje</i>	17
<i>Slika 13. Bukovi moždanik korišten kod rotacijskog zavarivanja drva</i>	17
<i>Slika 14. Zavarivanje uzoraka</i>	18
<i>Slika 15. Zavarena proba</i>	18
<i>Slika 16. Način pričvršćivanja uzorka za kidalicu</i>	20
<i>Slika 17. Ispitani uzorak</i>	20
<i>Slika 18. Program mjerenja temperature</i>	22
<i>Slika 19. Temperaturne sonde</i>	22
<i>Slika 20. Prosječne temperature prema sondama (BO_865_20)</i>	23
<i>Slika 21. Prosječne temperature prema sondama (BO_865_25)</i>	25
<i>Slika 22. Prosječne temperature prema sondama (BO_1520_20)</i>	26
<i>Slika 23. Prosječne temperature prema sondama (BO_1520_25)</i>	28
<i>Slika 24. Prosječne temperature prema sondama (BU_865_20)</i>	30
<i>Slika 25. Prosječne temperature prema sondama (BU_865_25)</i>	32
<i>Slika 26. Prosječne temperature prema sondama (BU_1520_20)</i>	34
<i>Slika 27. Prosječne temperature prema sondama (BU_1520_25)</i>	36
<i>Slika 28. Usporedba izvlačnih sila borovine</i>	38
<i>Slika 29. Usporedba temperatura zavarivanja borovine</i>	40
<i>Slika 30. Usporedba izvlačnih sila bukovine</i>	42
<i>Slika 31. Usporedba temperatura zavarivanja bukovine</i>	43
<i>Slika 32. Zavarivanje drva u trodimenzionalnom pravokutnom koordinatnom sustavu. A – točka u kojoj se mjeri temperatura</i>	44
<i>Slika 33. Zavarivanje drva u trodimenzionalnom pravokutnom koordinatnom sustavu. A – točka u kojoj se mjeri temperatura</i>	46
<i>Slika 34. Usporedba izvlačnih sila skupina borovine</i>	55
<i>Slika 35. Usporedba temperatura zavarivanja skupina borovine</i>	57
<i>Slika 36. Usporedba izvlačnih sila skupina bukovine</i>	59
<i>Slika 37. Usporedba temperatura zavarivanja bukovine</i>	61

POPIS TABLICA

<i>Tablica 1 Fizička svojstva borovine.....</i>	<i>9</i>
<i>Tablica 2. Mehanička svojstva borovine</i>	<i>9</i>
<i>Tablica 3 Fizička svojstva bukovine</i>	<i>11</i>
<i>Tablica 4 Mehanička svojstva bukovine</i>	<i>11</i>
<i>Tablica 5. Oznaka uzoraka</i>	<i>21</i>
<i>Tablica 6. Rezultati izvlačne sile statističke obrade uzoraka borovine</i>	<i>37</i>
<i>Tablica 7. Rezultati temperature zavarivanja statističke obrade uzoraka borovine</i>	<i>39</i>
<i>Tablica 9 Prikaz rezultata izvlačne sile statističke obrade uzoraka bukovine</i>	<i>41</i>
<i>Tablica 9. Rezultati temperature zavarivanja statističke obrade uzoraka borovine</i>	<i>42</i>
<i>Tablica 10 Deskriptivna statistika izvlačne sile zavarivanja uzoraka borovine</i>	<i>54</i>
<i>Tablica 11 Testiranje homogenosti varijance izvlačne sile skupina borovine.....</i>	<i>54</i>
<i>Tablica 12. Analiza homogenosti izvlačne sile skupina borovine</i>	<i>54</i>
<i>Tablica 13 Višestruki post hoc test izvlačnih sila skupina borovine.....</i>	<i>55</i>
<i>Tablica 14. Deskriptivna statistika temperature zavarivanja uzoraka borovine</i>	<i>56</i>
<i>Tablica 15 Testiranje homogenosti varijance temperature zavarivanja skupina borovine.....</i>	<i>56</i>
<i>Tablica 16 Višestruka usporedba (Kruskal - Wallis test) temperatura zavarivanja skupina borovine</i>	<i>56</i>
<i>Tablica 17 Višestruki post hoc test temperatura zavarivanja skupina bukovine</i>	<i>57</i>
<i>Tablica 18 Rezultati izvlačne sile statističke obrade uzoraka bukovine</i>	<i>58</i>
<i>Tablica 19 Testiranje homogenosti varijance izvlačne sile skupina bukovine</i>	<i>58</i>
<i>Tablica 20 Analiza homogenosti izvlačne sile skupina bukovine.....</i>	<i>58</i>
<i>Tablica 21 Višestruki post hoc test izvlačnih sila skupina bukovine</i>	<i>59</i>
<i>Tablica 22 Rezultati temperature zavarivanja statističke obrade uzoraka borovine</i>	<i>60</i>
<i>Tablica 23 Testiranje homogenosti varijance temperature zavarivanja skupina bukovine</i>	<i>60</i>
<i>Tablica 24 Višestruka usporedba (Kruskal - Wallis test) temperatura zavarivanja skupina borovine</i>	<i>60</i>
<i>Tablica 25 Višestruki post hoc test temperatura zavarivanja skupina bukovine</i>	<i>61</i>

POPIS GRAFIKONA

<i>Graf 1. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BO_865_20).....</i>	<i>24</i>
<i>Graf 2. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BO_865_25).....</i>	<i>25</i>
<i>Graf 3. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BO_1520_20).....</i>	<i>27</i>
<i>Graf 4. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BO_1520_25).....</i>	<i>29</i>
<i>Graf 5. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BU_865_20).....</i>	<i>31</i>
<i>Graf 6. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BU_865_25).....</i>	<i>33</i>
<i>Graf 7. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BU_865_20).....</i>	<i>35</i>
<i>Graf 8. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BU_1520_25).....</i>	<i>37</i>

PREDGOVOR

Diplomski rad je baziran na istraživanju utjecaja temperature na čvrstoću rotacijski zavarenog spoja. Cilj rada je prikazati statističku analizu čvrstoće i temperature zavarivanja kod rotacijski zavarenog bukovog moždanika u borovu ili bukovu podlogu, te izradu modela prijenosa topline.

Statističkom analizom utvrđeno je kako uzorci borovine zavareni većom frekvencijom vrtnje (1520 min^{-1}) postižu prosječno veće iznose izvlačne sile, dok kod bukovine između skupina (kombinacija različitih frekvencija vrtnje i dubine zavarivanja) ne postoje statistički značajne razlike. Nadalje, došlo se do zaključka kako ne postoji statistički značajna razlika između uzoraka iste frekvencije. Međutim, postoji statistički značajna razlika između uzoraka različite frekvencije.

Također, utvrđeno je kako temperatura zavisi o frekvenciji vrtnje. U usporedbi s frekvencijom vrtnje od 865 min^{-1} veće iznose temperature postižu uzorci zavareni frekvencijom 1520 min^{-1} .

Izrađen je model prijenosa topline u svrhu dobivanja točnijih rezultata temperatura zavarivanja uzimajući u obzir vrijeme, intenzitet toplinskog izvora i sposobnost materijala da prenese toplinsku energiju od izvora do mjernog mjesta.

Zahvaljujem svom mentoru doc. dr. sc. Ivici Župčiću na prenesenom znanju, strpljenju, pomoći i stručnom vodstvu kod izrade ovog diplomskog rada, te stručnom suradniku Ivanu Žulju na velikom strpljenju, vodstvu i pomoći kod izrade ispitnih proba i ispitivanja istih. Također želio bi zahvaliti dr. sc. Kristijanu Radmanoviću na pomoći u izradi modela izračuna prijenosa topline.

Najveće hvala zaslužuju moja obitelj i djevojka, koji su bili uz mene kroz uspone i padove. Hvala im na svojoj ljubavi, bezuvjetnoj podršci i strpljenju tijekom studiranja, te se nadam da ću ispuniti sva dana očekivanja.

1. UVOD

Stalnim promjenama u prirodi i strahom od budućnosti stvara se povećana ekološka svijest, a time i traženje ekoloških pristupa konstrukcije spojeva i materijala.

Drvo kao prirodni i ekološki materijal trebao bi biti najkorišteniji materijal i zbog svoje obnovljivosti. Znanstvenici i tehnolozi su u svakodnevnom traganju za konstrukcijskim rješenjima kojima je cilj smanjenje količine neprirodnih materijala u proizvodu, ne povećavajući značajno samu cijenu proizvoda. Svakodnevna praksa u drvenoj industriji u svrhu povećanja čvrstoće koristi adhezive koji su više ili manje na prirodnoj bazi. Kako drvo prirodno sadrži vezivne elemente (lignin), stvorilo se razmišljanje kako upotrijebiti elemente koje drvo sadrži samo po sebi. Međutim, trebalo je prvo odgovoriti na pitanje: Kako iskoristiti taj potencijal drva? Odgovor je vrlo jednostavan, temperaturom. Nadalje, kojim postupcima? Zavarivanje drva je postupak ostvarivanja adhezijske veze između dva ili više drvenih elemenata bez dodavanja adheziva. Ostvaruje se trenjem ili vibracijom koja stvara povišenu temperaturu te omekšava i rastaljuje lignin i hemicelulozu te se međusobno isprepleću drvena vlakanca. Hlađenjem spoja, spoj otvrdnjava i postaje čvrst.

U radu će se istraživati utjecaj frekvencije vrtnje (865 i 1520 min^{-1}) i dubina zavarivanja (20 i 25 mm) na temperaturu u rotacijski zavarenom spoju. Smjer zavarivanja je okomit na smjer vlakancu uz konstantno trajanje zavarivanja. Temperatura je izmjerena pomoću mjernih sonde postavljenih okomito na smjer provrta za moždanik. Pozicija mjernih sonde definirana je u ovom istraživanju. Bukov moždanik zavarivati će se u podlogu izrađenu iz bukovine ili borovine. Proučena su dosadašnja istraživanja na spomenutu temu, te izvršena usporedba s vlastitim rezultatima istraživanja.

Također, izrađen je model prijenosa topline u svrhu dobivanja točnijih rezultata temperatura zavarivanja.

2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

2.1. Zavarivanje drva

Zavarivanje drva je relativno novi način spajanja dvaju ili više elemenata drva ili drvnih ploča bez upotrebe ljepila. U nastavku će se proučiti dvije najčešće korištene metode zavarivanja drva- zavarivanje vibracijskom i rotacijskom metodom.^{1 2}

2.1.1. Rotacijsko zavarivanje drva

Rotacijsko zavarivanje prvi su patentirali Suthoff i dr. (1996.)³ u Njemačkoj. Prilikom rotacijskog zavarivanja podloga miruje dok se moždanik rotira oko svoje osi. Trenje je posljedica koja se javlja na dodirnim površinama. Rotacijom moždanika većeg promjera u provrt manjeg promjera stvara se toplina koja omekšava strukturu drva (ponajviše lignin i hemicelulozu) te dolazi do ispreplitanja drvnih vlaknaca. Hlađenjem spoja nastaje čvrsto zavaren spoj.⁴

Pizzi i dr. (2004.)⁵ su proveli usporedbu bukovih glatkih (oznake kasnije u tekstu, tip A) i bukovih nažljebljenih (oznake kasnije u tekstu, tip B) moždanika u svrhu uvida utjecaja na čvrstoću zavarenog spoja. U istraživanju su korišteni bukovi moždanici tipa A i tipa B promjera 10 mm i 80 mm dužine. Pripremljeni su provrti u uzorcima od 10, 9 i 8 mm, a dubine 12 mm. Moždanici su zavareni frekvencijama 800 i 1200 min⁻¹. Istraživanje je provedeno na bukovini (*Fagus Sylvatica*) i norveškoj smrekovini (*Picea abies*). Vlažnost ispitnih uzoraka iznosila je 12%, a smjer zavarivanja je varirao (radijalni, tangentialni i longitudinalni). Vrijeme zavarivanja iznosilo je između 0,2 i 4 s. Nakon zavarivanja uzorci su kondicionirani na 20°C i 65% vlažnosti zraka tjedan dana. Nakon klimatiziranja, ispitana je izvlačna sila. Značajno najveću izvlačnu silu postigao je bukovi uzorak s provrtom od 8 mm s nažljebljenim moždanikom frekvencije 1200 min⁻¹ (prosjeak 883 N, max 1500 N). U radu je zaključeno da statistički značajni utjecaj stvaraju: vrsta uzorka, promjer provrta u uzorku i vrijeme zavarivanja. Nadalje, osim što zavareni moždanici imaju statistički neznačajno veću čvrstoću u usporedbi s lijepljenim moždanicama PVAc ljepilom što potvrđuju Gutowski i Dodiuk (2013.)⁶ te

¹ Župčić, I., Mihulja, G., Bogner, A., Grbac, I., 2011: Vrijeme trajanja zavarivanja kao važan čimbenik zavarivanja bukovine, *Drvna industrija*, 62 (2) 115 – 121

² Župčić, I., Mihulja, G., Bogner, A., Grbac, I., Hrovat, B., 2008: Zavarivanje masivnog drva, *Drvna industrija*, 59 (3) 113 – 119

³ Suthoff, B., Franz, U., Hentschel, H., Schaaf, A. 1996.: Verfahren zum reibschweissartigen Fügen und Verbinden von Holz. *Patentschrift DE*, 196(20), 273

⁴ Župčić, I. 2010.: Čimbenici koji utječu na spajanje tokarenih bukovih elemenata tehnikom zavarivanja. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb

⁵ Pizzi, A.; Leban, J. M.; Kanazawa, F.; Properzi, M.; Pichelin, F., 2004: Wood dowel bonding by high – speed rotation welding, *J. Adhesion Sci. Technol.*, 18 (11): 1263 – 1278

⁶ Gutowski, V., Dodiuk, H. 2013.: *Recent Advances in Adhesion Science and Technology*. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York

Župčić (2010.)⁷. Zavarenom spoju je potrebno par sekundi da postigne ukupnu čvrstoću dok je PVAc ljepilu potrebno 24 sata.

Kanazawa i dr. (2005.)⁸ ispitivali su parametre koji utječu na moždanik prilikom rotacijskog zavarivanja. Za potrebe istraživanja korišteni su moždanici, glatki i užljebljeni (tip A i tip B) promjera 10 mm i duljine 80 mm. Na bukovim uzorcima bušeni su provrti dubine 30 mm gdje je provrt početnih 20 mm promjera 8 mm, a sljedećih 10 mm promjera 7,5 mm. Frekvencija zavarivanja bila je 1200 min⁻¹. Nakon zavarivanja uzorci su stavljeni na kondicioniranje (20 °C i 65 vlažnosti zraka) tjedan dana. Brzina zavarivanja je varirala, 100 mm/min i 400 mm/min. Prilikom zavarivanja postigla se temperatura nešto veća od 183 °C s brzim opadanjem gdje se za 1 min temperatura spustila na 60-70 °C. Temperatura je mjerena termalnom kamerom. Kako bi se moglo izvršiti snimanje, izrađen je utor kroz provrt. Autori su zaključili da vjerojatno temperatura prelazi 200 °C. Međutim, zbog ograničenosti u brzini kamere, nisu bili u mogućnosti izmjeriti točnu temperaturu što potvrđuje kasnije i Rodriguez i dr. (2010.)⁹. Rodriguez i dr. proveli su istraživanje na brezovini (*Betula Alleghaniensis*) i javorovini (*Acer Saccharum*). U istraživanju su korišteni glatki bukovi moždanici promjera 9,68 mm i duljine 82 mm, a na uzorcima brezovine i javorovine izbušeni su provrti različitih promjera (7,14, 7,37 i 7,67 mm) u tri različita smjera (radijalnom, tangentnom i longitudinalnom smjeru) na dubinu od 25 mm. Također, korištene su tri frekvencije vrtnje (1000, 1500 i 2500 min⁻¹). Prije zavarivanja uzorci su stavljeni na kondicioniranje (20 °C i 65% vlažnosti zraka). U ovom istraživanju su korišteni brzoreagirajući senzori stavljeni u bočne provrte na udaljenosti od 1 i 2 mm od linije zavara kako bi se mogla izmjeriti temperatura. Temperatura zavarivanja direktno je vezana za frekvenciju vrtnje. Odnosno, što je veća frekvencija vrtnje stvara se veća temperatura. Tako za javorovinu kod 1000 min⁻¹ prosječna temperatura je između 269 i 273 °C, za 1500 min⁻¹ prosječna temperatura je između 279 i 281 °C, a kod 2500 min⁻¹ prosječna temperatura je između 311 i 323 °C. Prosječna temperatura brezovine frekvencije vrtnje 1000 min⁻¹ iznosi između 243 i 252 °C, za 1500 min⁻¹ prosječna temperatura je između 263 i 277 °C, a kod 2500 min⁻¹ prosječna temperatura iznosi između 306 i 308 °C. Maksimalne temperature zavarivanja postignute su za 0,7 – 2 s. Dobivenom temperaturom zavarivanja autori utvrđuju kako se termalnom kamerom ne dobivaju pouzdani rezultati. Nadalje, do gotovo jednakih rezultata temperatura, s jednakim parametrima, postupcima i vrstama drva došli su i Belleville i dr. (2012.)¹⁰

⁷ Župčić, I. 2010.; Čimbenici koji utječu na spajanje tokarenih bukovih elemenata tehnikom zavarivanja. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb

⁸ Kanazawa, F.; Pazzi, A.; Properzi, M.; Delmotte, L.; Pichelin, F. 2005: Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation, J Adhesion Sci. Technol., 19 (12): 1025 – 1038

⁹ Rodriguez, G., Diouf, P., Blanchet, P., Stevanovic, T. 2010.: Wood – Dowel Bonding by High-Speed Rotation Welding – Application to Two Canadian Hardwood Species. J Adhesion Sci. Technol., 24 (2010): 1423 – 1436

¹⁰ Belleville, B., Stevanovic, T., Pizzi, A., Cloutier, A., Blanchet, P. 2012.: Determination of optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species. J Adhesion Sci. Technol., DOI: 10.1080/01694243.2012.687596

Resch i dr. (2006.)¹¹ proveli su istraživanje debljinskog spajanja ploča rotacijskim zavarivanjem. U istraživanju su se koristile ploče: iverica, furnirska ploča (furnir topolovine), OSB i MDF (Medium Density Fibreboard). Kao usporedba, koristio se način spajana s čavlima u OSB ploči, te zavarjeno cjelovito drvo bukovine. Dimenzija uzoraka iznosila je 170 x 60 x 18 mm, a na uzorcima su bušeni provrti promjera 8 mm. U svrhu zavarivanja korišteni su užljebljeni bukovi moždanici promjera 10 mm. Ispitivanjem je utvrđeno kako se ploče mogu jednako dobro zavarivati kao i masivno drvo, tako izvlačna sila za bukovinu iznosi 9500 N. Iznos izvlačne sile za OSB iznosi 8800 N, ivericu 8800 N, MDF (Medium Density Fibreboard) 9000 N i furnirska ploča 7100 N. OSB ploča spajana s čavlima postiže izvlačnu silu od 10500 N. Vidljivo je da je razlika u čvrstoćama spoja približno jednaka, uz iznimku furnirske ploče koja je izrađena iz topolovine. Prilikom zavarivanja utvrđeno je da je linija zavarivanja dobro formirana, stoga autori zaključuju kako ljepilo i razni dodaci nemaju značajan utjecaj na proces rotacijskog zavarivanja.

Autori Zoulalian i Pizzi (2007.)¹² su izradili model prijenosa topline stvarajući veze između temperature, vremena trajanja trenja i toplinskih strujanja kod rotacijskim zavarivanjem moždanika. Temperatura kontaktnih površina može se odrediti kao funkcija vremena i trajanja trenja prema formuli:

$$T_0 = T_i + \frac{2 \cdot \beta \cdot \mu \cdot \tau \cdot \sqrt{\alpha}}{h \cdot \sqrt{\pi}} * \sqrt{t}$$

gdje je:

T_0 – temperatura zavarivanja

T_i – početna temperatura drva

t – vrijeme zavarivanja

τ - trenje kod pritiska

μ - frekvencija vrtnje ili vibracija

β - mehanička energija trenja pretvorena u toplinsku energiju (za rotacijsko i linearno zavarivanje iznosi $0,080 \pm 0,01$)

h – toplinska vodljivost

α - difuznost drva

Prema rezultatima istraživanja, za rotacijsko zavarivanje optimalna temperatura zavarivanja iznosi 183 °C, međutim s prestankom djelovanja trenja temperatura naglo opada.

Pizzi i dr. (2006.)¹³ su vršili spajanje dva bukova elementa uz pomoć moždanika rotacijskim zavarivanjem. Izrađena su dva tipa uzorka. Kod prvog tipa moždanik se

¹¹ Resch, L.; Despres, A.; Pizzi, A.; Bocquet, J. F.; Leban, J. M. 2006: Welding-through doweling of wood panels. *Holz als Roh- und Werkstoff* (2006) 64: 423–425

¹² Zoulalian, A., Pizzi, A., 2007: Wood-dowel rotation welding – a heat – transfer model. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 21 (2) 97-108

¹³ Pizzi, A., Despres, A., Mansouri, H.R., Leban, J.-M. 2006: Wood joints by through-dowel rotation welding microstructure, ¹³C-NMR and water resistance. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 20 (5) 427 - 436

zavaruje kroz oba elementa, dok kod drugog moždanik je zavaren do određene dubine u drugom uzorku. Dimenzije elemenata iznosile su 40 x 40 x 30 mm, tako da su dimenzije uzorka iznosile 40 x 40 x 60 mm. Provrti na uzorcima su bili promjera 8 mm, dok je bukovi moždanike promjera 10 mm. Za usporedbu je izrađen testni uzorak gdje su elementi lijepljeni PVAc ljepilom. Kondicionirani zavareni uzorci imali su veću čvrstoću od lijepljenih uzoraka, te značajno veću čvrstoću nakon uranjanja u hladnoj vodi 24 sata (zadržano čak 88% početne čvrstoće).

Leban i dr. (2008.)¹⁴ su proučavali ovisnost frekvencije na rotacijsko zavarivanje. Korišteni su užljebljeni moždanici bukovine (*Fagus Sylvatica*) s promjerom 12 mm i duljine 80 mm. Uzorci su od smrekovine (*Picea Abies*) sadržaja vode 12% s provrtima promjera 9,5 mm do dubine od 15 mm, dok je promjer do 46 mm dubine iznosio 8 mm. Ispitano je zavarivanje s frekvencijama: 1500, 4000, 6000 i 6500 min⁻¹. Trajanje zavarivanja iznosilo je između 2 i 4 s. Najbolji rezultati izvlačne čvrstoće postignuti su s frekvencijom od 1500 min⁻¹ dok se povećanjem frekvencije smanjuje čvrstoća. Razlog tome je da kod većih frekvencija je povećana koncentracija uništenog staničja, odnosno postiže se veliki porast temperature čime se rastaljeni materijal previše udaljuje od linije zavara i time stvara gladnu sljubnicu.

Istraživanja o rotacijskom zavarivanju provedena su i na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Autori Župčić i dr. (2008.)¹⁵ istraživali su optimalan oblik rupe kod kojeg bi linija zavara obuhvaćala cijeli obod moždanika. Provedeno je ispitivanje debljinskog sastavljanja s uzorcima hrastovine i smrekovine gdje je hrastovina uvijek s gornje strane. Dimenzije uzorka su iznosile 30 x 200 x 40 mm. U radu je korišteno stupnjevanje provrta u uzorku s provrtima promjera 9, 8, 7 i 6 mm. Razlikujemo 4 tipa uzorka i lijepljeni uzorak. Tip 1 imao je provrt po cijeloj dubini promjera 8 mm. Tip 2 je sadržavao provrt 8 mm kroz hrastovi element i 10 mm dubine smrekovi promjera 8 mm, dok sljedećih 10 mm promjer je iznosio 6 mm. Kod tipa 3 provrt kroz hrastovinu iznosio je 8 mm, a kroz smrekovinu 6 mm. Tip 4 se sastoji od četiri zone promjera provrta, prvih 15 mm dubine hrastovine iznosi 9 mm, sljedećih 15 mm iznosi 8 mm, prvih 10 mm dubine smrekovine promjera 7 mm, dok posljednjih 10 mm promjer provrta iznosi 6 mm. Korišteni su užljebljeni moždanici promjera 10 mm. Također, izvršena je usporedba s uzorcima s lijepljenim moždanicama. Zaključeno je kako postoji statistički značajna razlika između zalijepljenog i zavarenog moždanika. Moždanik zalijepljen u hrastovu podlogu postiže veću izvlačnu silu od zavarenog moždanika u hrastovu podlogu. Nadalje, dobiveno je da moždanik zavaren u hrastovu podlogu postiže veću izvlačnu silu u odnosu na zalijepljeni ili zavareni moždanik u smrekovu podlogu. Najmanju izvlačnu čvrstoću postižu uzorci tipa 1 gdje je utvrđeno kako ne postoji statistički značajna razlika između uzoraka tipa 2 i 3. Očekivano tip 1 postigao je najmanju izvlačnu čvrstoću, dok je tip 4 sa stupnjevanjem provrta postigao najviše rezultate.

¹⁴ Leban, J.-M., Mansouri, H.R., Omrani, P., Pizzi, A. 2008: Dependence of dowel welding on rotation rate. Holz Roh Werkst, DOI 10.1007/s00107-008-0228-6

¹⁵ Župčić, I., Mihulja, G., Bogner, A., Grbac, I., Horvat, B., 2008: Zavarivanje masivnog drva, Drvena industrija 59 (3) 113 – 119

Auchet i dr. (2010.)¹⁶ su uspoređivali razliku između konstantne brzine zavarivanja i promjenjive (ubrzavajuće) brzine zavarivanja. U istraživanju su korišteni užljebljeni i glatki bukovi moždanici promjera 10 mm i duljine 80 mm. Uzorci su izrađeni iz bukovine (*Fagus Sylvatica*) s izbušenim provrtima promjera 8 mm, a dubine 24 mm. Frekvencija zavarivanja iznosi 1600 min⁻¹. Nakon što su uzorci zavareni, odlažu se na kondicioniranje (20 °C i 65% vlažnosti zraka) tjedan dana. Stroj za zavarivanje je kod zavarivanja posjedovao uređaj koji je mijenjao brzinu zavarivanja. Najbolji rezultati postignuti su kod konstantne brzine zavarivanja (20 mm/s) u iznosu od 4,7 MPa, dok kod promjenjive brzine zavarivanja postignuta je čvrstoća sa svega 3 MPa.

Župčić i dr. (2011.)¹⁷ su istraživali kako je vrijeme trajanja zavarivanja bitan čimbenik kod zavarivanja bukovine. Za zavarivanje su korišteni bukovi uzorci dimenzija 200 x 30 x 30 mm s provrtima promjera 8 mm. Korišteni su razno užljebljeni moždanici promjera 10,04 mm i duljine 120 mm. Frekvencija vrtnje iznosila je 1520 min⁻¹, a moždanici su zavarivani na dubinu od 20 mm. Nakon zavarivanja uzorci su kondicionirani na određenim uvjetima (23 °C i 50% vlažnosti zraka) osam dana. Utjecaj vremena zavarivanja za radijalno-tangentni presjek (smjer okomito na vlakanca) na izvlačnu silu u intervalu između 0,56 i 2,61 s. Raspon je podijeljen u 5 intervala promatranja. Najbolji rezultati postignuti su u trajanju između 0,56 i 0,9 s, pri čemu je prosječna izvlačna sila iznosila 4994 N. Većim trajanjem zavarivanja smanjuje se iznos izvlačne sile, tako da je za interval od 1,81 do 2,61 s prosječna izvlačna sila iznosila 2869 N.

Utjecaj na vrste drva i presjeka na čvrstoću rotacijski zavarenog spoja proučavali su Župčić i dr. (2014.)¹⁸. Korišteni su uzorci drva bukve (*Fagus Sylvatica* L.), hrasta lužnjaka (*Quercus Robur* L.) i smreke (*Picea Abies* L.). Ispitivanje se vršilo u smjeru vlakancu podloge i okomito na njihov smjer (radijalni, radijalno/tangentni i tangentni). Korišteni su bukovi užljebljeni moždanici prosječnog promjera 10,04 mm, dok su uzorci bušeni svrdlom promjera 8 mm. Uzorci su kondicionirani šest mjeseci na 23 ± 2 °C i 50 ± 5% vlažnosti zraka. Prije testiranja izmjeren je sadržaj vode i gustoća baze uzoraka koji su iznosili za bukovinu 9,13% sadržaja vode s gustoćom od 0,68 g/cm³, hrastovina sadrži 9,33% sadržaja vode i gustoće 0,69 g/cm³, a smrekovina sadrži 10,37% sadržaja vode s gustoćom od 0,45 g/cm³. Moždanici su zavarivani na dubinu od 20 mm s frekvencijom vrtnje od 1520 min⁻¹. Prema rezultatima istraživanja, vrsta drva i presjek imaju značajan utjecaj na izvlačnu silu. Najveće rezultate izvlačne sile postigli su moždanici zavareni u bukovi poprečni presjek. Također, utvrđeno je da postoji statistički značajna razlika između iznosa izvlačne sile zavarenih moždanika u smjeru vlakancu i okomito na smjer vlakancu. Međutim, ne postoji značajna statistička razlika između iznosa izvlačne sile u smjerovima okomito na smjer vlakancu (radijalni, radijalno/tangentni i tangentni). Prema rezultatima istraživanja,

¹⁶ Auchet, S., Segovia, C., Mansouri, H.R., Meausoone, P.-J., Pizzi, A., Omrani, P. 2010: Accelerating vs Constant Rate of Insertion in Wood Dowel Welding. J. Adhesion Sci. Technol., 24 (2010) 1319 - 1328

¹⁷ Župčić, I., Bogner, A., Grbac, I. 2011.: Vrijeme trajanja zavarivanja kao važan čimbenik zavarivanja bukovine. Drvna industrija 62 (2) 115 - 121

¹⁸ Župčić, I., Vlaović, Z., Domljan, D., Grbac, I. 2014.: Influence of Various Wood Species and Cross-Sections on Strength of a Dowel Welding Joint. Drvna industrija 65 (2) 121 - 127

bukovina je najpogodnija vrsta drva za zavarivanje moždanicama bez obzira na orijentaciju vlaknaca.

2.1.2. Vibracijsko zavarivanje

Zavarivanjem uz pomoć vibracija odvija se na način da dva drvena elementa međusobno vibriraju. Usred trenja između dvaju dodirnih površina stvara se toplota koja omekšava hemicelulozu i lignin u strukturi stanica drva. Uslijed hlađenja drvo otvrdnjava čime se stvara čvrst spoj. Također, usred trenja se isprepleću drvena vlaknaca. Vibracijsko zavarivanje se koristi za najčešće koristi za širinsko i debljinsko sastavljanje.^{19 20}

Prema Stamm i dr. (2005.)²¹, vrijeme otvrdnjavanja spoja je manje od 1 minute bez ikakve pripreme površine. Za usporedbu, kod lijepljenja potrebna je priprema površina i sušenje koje traje nekoliko sati (ovisno o adhezivu). Vibracijom dolazi do prosječne temperature od 400 °C (673 K) i dolazi do razgradnje strukture drva. Proučavajući svojstva spoja došli su do zaključka da se zavarivanje odvija u dva dijela. Prvi dio obuhvaća zagrijavanje (nastaje trenjem kontaktnih površina uz djelovanje pritiska i topline), dok drugi dio hlađenje zagrijane sljubnice. Rezultatima istraživanja utvrđeno je kako se 20 s nakon početka hlađenja postiže 70% ukupne čvrstoće zavarenog spoja promatranog u intervalu od 15 min hlađenja.

Prema Gfeller i dr (2003.)²², čvrstoća vibracijsko zavarenog spoja dva elementa bukovine (*Fagus Sylvatica*) iznosi 10 MPa, dok prosječna čvrstoća dva elementa Norveške smrekovine (*Picea abies*) iznosi 4,2 MPa. Kombinacija bukovog i smrekovog uzorka iznosila je 4,4 MPa.

Čvrstoću vibracijsko zavarenih bukovih elemenata ispitivali su Pizzi i dr (2003.)²³ koristeći elemente dimenzije 150x20x15 mm. Elementi su spajani frekvencijom od 100 Hz. Vrijeme zavarivanja iznosilo je 3 s s pritiskom od 2 MPa. Prosječna čvrstoća je iznosila između 10 i 11 MPa što prema navodima autora zadovoljava Europsku normu EN 205-D1 iz 1992. godine.

Omrani i dr. (2009.)²⁴ su proveli istraživanje širinskog sastavljanja profiliranih sljubnica pomoću linearno vibracijskog zavarivanja. Prema rezultatima, vidljivo je kako nažljebljene površine nisu utjecale na povećanje čvrstoće spoja. Prema dobivenim rezultatima, opravdano je korištenje jednostavnijih ravnih sljubnica. Kod pojedinih uzoraka je došlo do pojave pukotina koje su uzrokovale smanjenje čvrstoće. Kod

¹⁹ Gfeller B., Pizzi A., Zanetti M., Properzi M., Pichelin F., Lehmann M., Delmotte L., 2004: Solid wood joints by in situ welding of structural wood constituents. *Holzforschung* 58(1):45–52 (2004)

²⁰ Župčić, I., Mihulja, G., Bogner, A., Grbac, I., Hrovat, B., 2008: Zavarivanje masivnog drva, *Drvena industrija*, 59 (3) 113 – 119

²¹ Stamm, B., Natterer, J., navi, P. 2005: Joining of wood layers by friction welding. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 19 (13 – 14): 1129 - 1139

²² Gfeller, B., Pizzi, A., Zanetti, M., Properzi, M., Pichelin, F., Lehmann, M., Delmotte, L. 2003: Wood bonding by vibrational welding, *J. Adhesion Sci. Technol.* 17, 1573–1589

²³ Pizzi. A.; Properzi, M.; Leban, J. M.; Pichelin, F. 2003: Mechanically – induced wood welding. *Maderas. Ciencia y tecnologia*, 5 (2): 101 – 106

²⁴ Omrani, P.; Mansouri, H. R.; Pizzi, A. 2009: Linear welding of grooved wood surfaces. *Eur. J. Wood Prod.*, 67 (4): 479 – 481

sljubnica koje su imale izrađen utor za odvodnju vodene pare, zabilježeno je povećanje čvrstoće, no ono nije statistički značajno. Time se potvrđuje teza utjecaja isparavanja vode za vrijeme linearnog zavarivanja.

Boonstra i dr. (2006.)²⁵ su vršili vibracijsko zavarivanje toplinski obrađenog drva. Istraživanje se temeljilo na usporedbi netretirane i toplinski tretirane brezovine (*Betula Alba*), topolovine (*Populus spp.*) i bukovine (*Fagus Sylvatica L.*). Toplinska obrada se vršila temperaturom između 150 i 280 °C, koja se vrši kako bi se povećala stabilnost i trajnost drva. Uzorci su dimenzija 20 x 15 x 150 mm i 20 x 30 x 150 mm. Vrijeme zavarivanja iznosilo je 3 s, s frekvencijom vrtnje od 100 Hz. Čvrstoća spoja tretiranog drva niža je od netretiranog drva. Tako čvrstoća netretirane bukovine iznosi 8,07 MPa, tretirane 4,32 MPa, netretirana brezočina 5,97 MPa, a tretirana 3,71 – 5,50 MPa. Manja čvrstoća povezana je s toplinskim tretmanom koji uzrokuje taljenje staničnog materijala, koji prilikom zavarivanja ne sudjeluju u povezivanju.

Mogućnosti zavarivanja drvnih ploča prvi su ispitali Ganne-Chedeville i dr. (2007.)²⁶. Provedeno je istraživanje linearnog zavarivanja rub – rub i lice – lice. Ispitana su četiri tipa drvnih ploča: OSB 18 mm, MDF 19 mm, neplemenjena iverica 19 mm, bukova furnirska ploča 18 mm/9, te okume furnirska ploča 19mm/9. Uzorci su dimenzija 20 x deb. uzorka x 150 mm. Vrijeme zavarivanja varira s obzirom na tip drvnih ploča, tako je za furnirske ploče vrijeme zavarivanja iznosilo 3 s, iverica 5 – 7 s, OSB 5,5 s, dok je za MDF duže vrijeme zavarivanja 8- 10 s. Čvrstoća iverice iznosi 2,8 MPa za rub, dok za lice 1,81 MPa; OSB za rub 3,09 MPa, a lice 2,34 MPa; MDF za rub 4,29 MPa, a lice 3,84 MPa; bukova furnirska ploča 6,21 MPa za rub, a lice 7,22 MPa; okume furnirska ploča za rub 4,36 MPa, a lice 2,09 MPa. Prema rezultatima linearno vibracijsko zavarivanje pruža zadovoljavajuće čvrstoće. Vidljivo je da je čvrstoća rub – rub veća od lice – lice. Razlog tome je čvrstoća samog materijala koja je manja od čvrstoće zavara.

2.2. Svojstva običnog bora (*Pinus Sylvestris L.*)

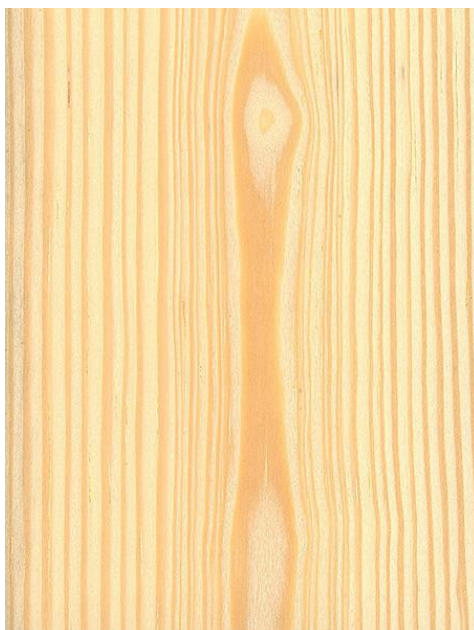
Drvo običnog bora pripada botaničkoj vrsti *Pinus sylvestris L.*, iz porodice *Pinaceae*. U Hrvatskoj je autohtona vrsta drva.

Bjeljika je različito široka, žućkasta ili crvenkasto bijela. Svježa srž je crvenkasto žuta (Slika 1), a kasnije potamni do smečkaste i crvenkasto smeđe boje. Godovi su uočljivi sa svijetlim ranim i tamnim kasnim drvom.²⁷ Prijelaz iz ranog u kasno drvo istog goda je oštar. Smolenice su brojne i na poprečnom presjeku uočljive običnim okom. U tablicama 1 i 2 prikazane su vrijednosti fizičkih i mehaničkih svojstava borovine.

²⁵ Boonstra, M., Pizzi, A., Ganne-Chedeville, C., Properzi, M., Lebad, J.M. 2006: Vibration welding of heat-treated wood. *J Adhesion Sci. Technol.*, 20 (4): 359 - 369

²⁶ Ganne-Chedeville, C., Properzi, M., Pizzi, A., Leban, J.-M., Pichelin, F. 2007: Edge and face linear vibration welding of wood panels. *Holz Roh Werkst.*, 65:83-85

²⁷ Petrić, B., Trajković, J., 1996.: OBIČNI BOR, *Drvna industrija* 47 (3) 123



Slika 1 Tangentni presjek borovine
(<http://www.wood-database.com/european-beech/>, 11.07.2017.)

Tablica 1 Fizička svojstva borovine²⁸

Fizička svojstva	Gustoća (ρ_0) kg/m ³	Gustoća (ρ_{12-15}) kg/m ³	Gustoća (ρ_s) kg/m ³	Poroznost %	Radijalno utezanje β_r %	Tangentno utezanje β_t %	Volumno utezanje β_v %
Vrijednost	300 - 490 - 860	330 - 520 - 890	750 - 800 - 850	oko 67	oko 4	oko 7,7	oko 12,1

Tablica 2. Mehanička svojstva borovine²⁹

Mehanička svojstva	Čvrstoća na tlak MPa	Čvrstoća na vlak \parallel MPa	Čvrstoća na savijanje MPa	Čvrstoća na smik MPa	Tvrdća (po Brinelu) MPa		Modul elastičnosti GPa
					\parallel	\perp	
Vrijednost	35 - 55 - 94	35 - 104 - 96	41 - 100 - 205,9	10 - 14,6	25 - 40 - 72	13 - 19 - 24	6,9 - 12 - 20,1

Borovina se lako obrađuje svim ručnim i strojnim alatima. Pri obradi dolazi do grešaka zbog usukanosti, truleži, kvrgavosti i zasmoljenosti. Lijepi se, boji i polira dobro. Međutim, borovina pripada razredu prirodno neotpornih vrsta drva. Srževina se

²⁸ Petrić, B., Trajković, J., 1996.: OBIČNI BOR, Drvna industrija 47 (3) 123

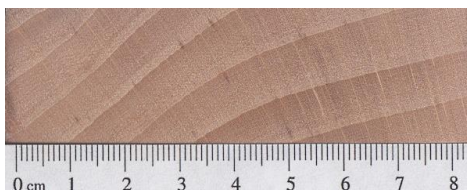
²⁹ Ibidem.

srednje teško tretira sredstvima za zaštitu drva, dok je bjeljika propusna. Nezaštićena bjeljika podložna je napadu kuckara (Petrić, Trajković, 1996.)³⁰.

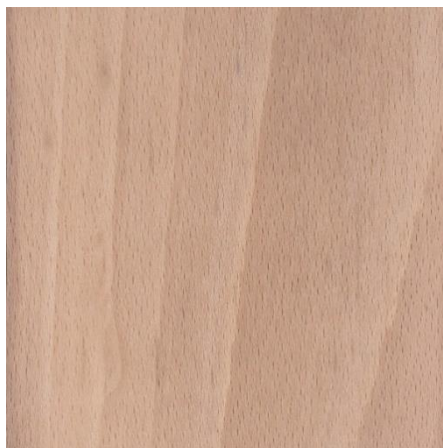
2.3. Svojstva bukovine (*Fagus Sylvatica L.*)

Drvo *obične bukovine* ili *europske bukovine* pripada botaničkoj vrsti *Fagus sylvatica L.*, iz porodice *Fagaceae*. Također, autohtona vrsta drva u Hrvatskoj.

Pore bukovine su brojne, pojedinačne i u skupinama (Slika 2). Prema kasnom drvu, veličina i broj pora se smanjuje, a volumni udio u drvu iznosi od 22,2 do 37,8 %. Bukovina je bakuljavo drvo, bjelkasto do vrlo blijedo smeđe boje, a stajanjem na zraku potamni do crvenkasto smeđe boje (Slika 3). Kod nekih stabala nastaju tamnija oboljenja srca tj. crveno srce (fakultativno obojena srž). Godovi su uočljivi, a drvo je rastresito porozno sa sitnim i brojnim porama. U tablicama 3 i 4 prikazane su vrijednosti fizičkih i mehaničkih svojstava bukovine.



Slika 2 Poprečni presjek bukovine³¹
(<http://www.wood-database.com/european-beech/>, 11.07.2017.)



Slika 3 Tangentni presjek bukovine³²
(<http://www.wood-database.com/european-beech/>, 11.07.2017.)

³⁰ Petrić, B., Trajković, J., 1996.: OBIČNI BOR, Drvna industrija 47 (3) 123

³¹ Trajković, J., Despot, R., 1996.: BUKOVINA, Drvna industrija 47 (4) 171

³² Ibidem.

Tablica 3 Fizička svojstva bukovine³³

Fizička svojstva	Gustoća (ρ_0) kg/m ³	Gustoća (ρ_{12-15}) kg/m ³	Gustoća (ρ_s) kg/m ³	Poroznost %	Radijalno utezanje β_r %	Tangentno utezanje β_t %	Volumno utezanje β_v %
Vrijednost	490 - 680 - 880	540 - 720 - 910	820 - 1070 - 1270	oko 55	oko 5,8	oko 11,8	14 - 17,9 - 21

Tablica 4 Mehanička svojstva bukovine³⁴

Mehanička svojstva	Čvrstoća na tlak MPa	Čvrstoća na vlak II MPa	Čvrstoća na savijanje MPa	Čvrstoća na smik MPa	Tvrdća (po Janki) MPa		Modul elastičnosti GPa
						⊥	
Vrijednost	41 - 62 - 99	57 - 135 - 180	74 - 123 - 210	8 - 9,5	oko 83	oko 65	100 - 160 - 180

Bukovina se dobro obrađuje strojno i ručno, a naročito dobro se tokari. Dobro se ljušti, a valjkasti oblik trupaca omogućava proizvodnju furnira i furnirskih ploča. Drvo se lijepi bez poteškoća i može se bojiti lazurama tako da odgovara hrastovini ili orahovini. Izrazito dobro se savija omekšana parenjem. Uspješno se savijaju komadi s kvrgama i komadi nepravilne građe. Može se i termo tretirati te ostvaruje dobre rezultate. Fakultativna srž (crveno srce) se može ublažiti parenjem. Nezaštićena bukovina nije otporna na napad ksilofagnih insekata i gljiva truležnica. Zaštićuje se hladnim ili toplim uranjanjem u zaštitna sredstva ili tlačnim postupcima čime se postiže prilično dobra zaštita. Fakultativna srž je vrlo nepermeabilna i teško se impregnira. (Trajković, Destop, 1996)³⁵

³³ Trajković, J., Despot, R., 1996.: BUKOVINA, Drvena industrija 47 (4) 171

³⁴ Ibidem.

³⁵ Ibidem.

3. MATERIJALI I METODE ISTRAŽIVANJA

3.1. Izbor korištenih materijala

Korištenje materijala borovine i bukovine za ovo istraživanje odabrani su slučajnim odabirom iz složaja suhe piljene građe. Kriteriji kod odabira elemenata su bili: pravilnost piljene građe, bez kvrga, pukotina i oštećenja.

3.1.1. Izbor masivnog drva

Pri istraživanju je korišten obični bor ili bijeli bor (*Pinus sylvestris* L.) i bukovina (*Fagus Sylvatica* L.).

Materijali potrebni za ispitivanje uzeti su iz komercijalnog složaja, kako bi se moguće promjene prilikom ispitivanja mogle povezati sa standardno proizvedenim drvnim elementima. Pomoću tako dobivenih rezultata bit će poznata svojstva spoja, koji se kasnije mogu primijeniti stvarnim uvjetima.

Prilikom odabira materijala za istraživanje korišteni su bukovi glatki drveni moždanici duljine od 1000 mm (odabrani su metodom slučajnog odabira). Glatki moždanici su izrađeni blanjanjem na četverostranoj blanjalici, te su za potrebe istraživanja piljeni na određenu duljinu od 120 mm kako bi se dobili odgovarajući moždanici. Moždanici su pregledani te nisu primijećene nikakve greške, poput raspuškina ili neprave srži.

3.2. Priprema uzoraka za zavarivanje okomito na smjer vlaknaca

3.2.1. Određivanje početnog sadržaja vode u uzorcima

Početni sadržaj vode određen je gravitacijskom metodom prema HRN ISO 3130 – 1975 pomoću formule:

$$W = \frac{mW - m_2}{m_2} \times 100 [\%]$$

Gdje je:

W – sadržaj vode u drvu nakon 7 dana prema HRN ISO 3130 – 1975 [%]

m_w – početna masa probe [g]

m_2 – masa probe nakon 7 dana

Gustoća drva je određivana na istim uzorcima prema HRN ISO 3131 – 1975 pomoću formule:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_{\max}} [\text{g/cm}^3]$$

Gdje je:

ρ_w – gustoća drva prema HRN ISO 3131 – 1975 [g/cm³]

m_w – početna masa probe [g]

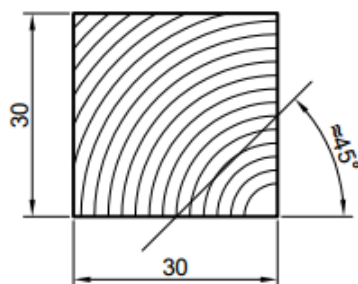
V_{\max} – maksimalan volumen probe [cm³]

Korišteno je 15 uzoraka borovine i 15 uzoraka bukovine dimenzija 30x30x15 mm. Izmjerene su dimenzije i masa uzoraka kako bismo gravimetrijskom metodom prema HRN ISO 3130-1975 odredili sadržaj vode i gustoću u uzorcima. Prosječni početni sadržaj vode u borovim uzorcima iznosio je 9,33 % (minimalni sadržaj vode iznosio je 8,89 %, a maksimalni sadržaj vode iznosio je 11,11 %), a prosječna gustoća iznosila je 0,547 g/cm³ (minimalna gustoća iznosila je 0,544 g/cm³, a maksimalna 0,556 g/cm³). Prosječan sadržaj vode u bukovim uzorcima iznosio je 11,37% (minimalni sadržaj vode iznosio je 9,67%, a maksimalni sadržaj vode iznosio je 11,48%), a prosječna gustoća iznosila je 0,503 g/cm³ (minimalna gustoća iznosila je 0,496 g/cm³, a maksimalna 0,504 g/cm³).

3.2.2. Priprema uzoraka

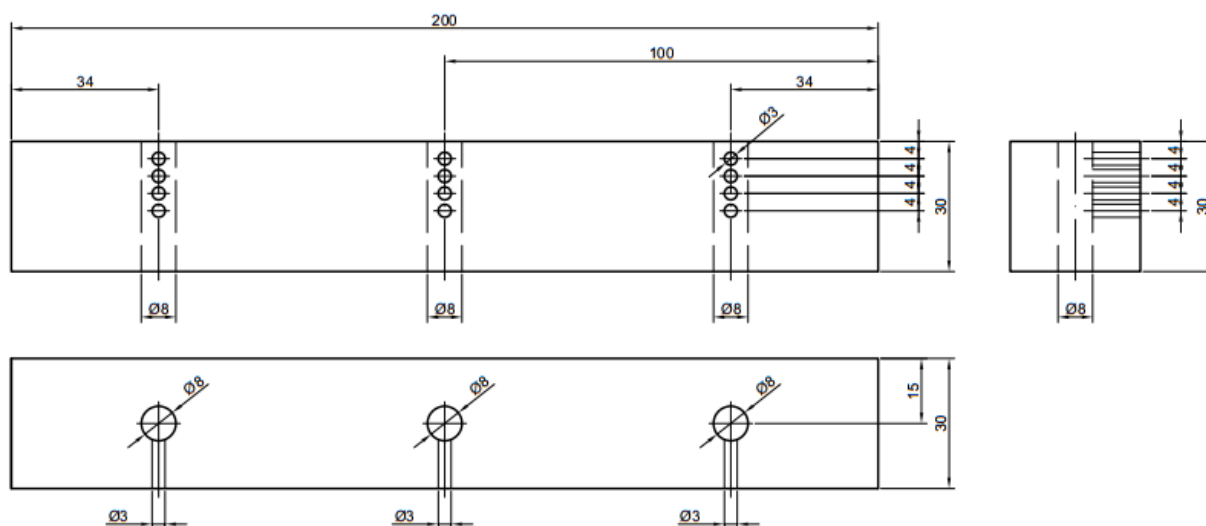
Prije same pripreme uzoraka uzet je probni uzorak radi određivanja trenutnog sadržaja vode i gustoće drva (borovine i bukovine). Prije određivanja uzorci su klimatizirani u klima komori temperature $23 \pm 2^\circ\text{C}$ i relativne vlage zraka $55 \pm 5\%$ minimalno 2 tjedna.

Prilikom izrade i pripreme uzoraka korištene su tehnologije piljenja, blanjanja, prikraćivanja uzoraka na konačnu mjeru, bušenje provrta na uzorcima za moždanike i bušenje provrta za sonde. Za provedbu istraživanja korišteni su uzorci dimenzija 30 x 200 x 30 mm za borovinu i 30 x 300 x 30 mm za bukovinu. Svi uzorci imaju približno sličnu radijalno - tangentnu teksturu (Slika 4.).



Slika 4. Radijalno - tangenta tekstura

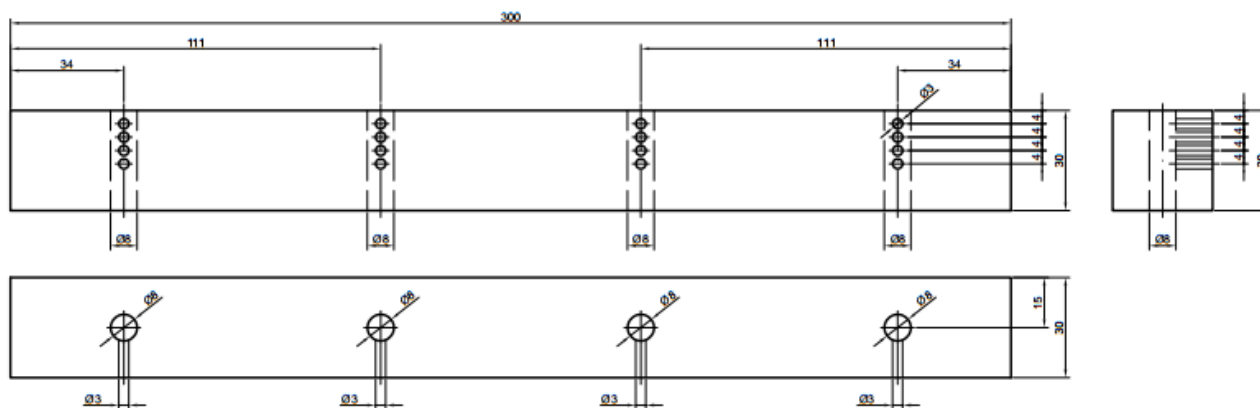
U svakom uzorku borovine bušena su po tri provrta, dok su kod uzorka bukovine bušena četiri provrta za moždanike. Na uzorcima borovine provrti su bušeni prema slici 5 i 6, dok na slici 7 i 8 vidimo pozicije bušenih provrta na uzorcima bukovine. Promjer provrta iznosio je 8 mm, a smjer zavarivanja je radijalno - tangenti.



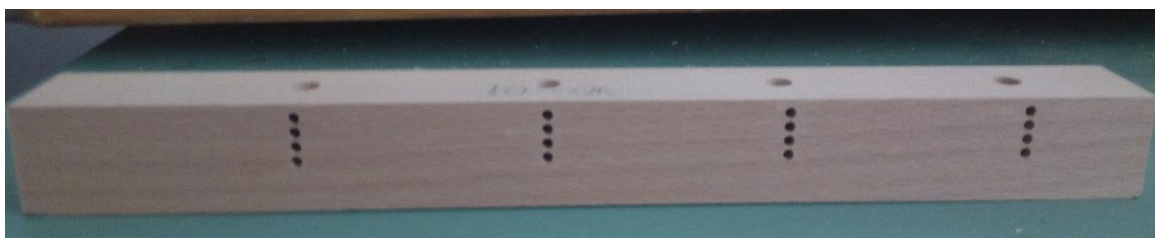
Slika 5. Shematski prikaz ispitnog uzoraka borovine za zavarivanje moždanika



Slika 6. Ispitni uzorak borovine

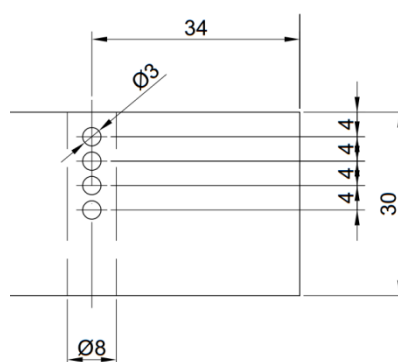


Slika 7. Shematski prikaz ispitnog uzoraka bukovine



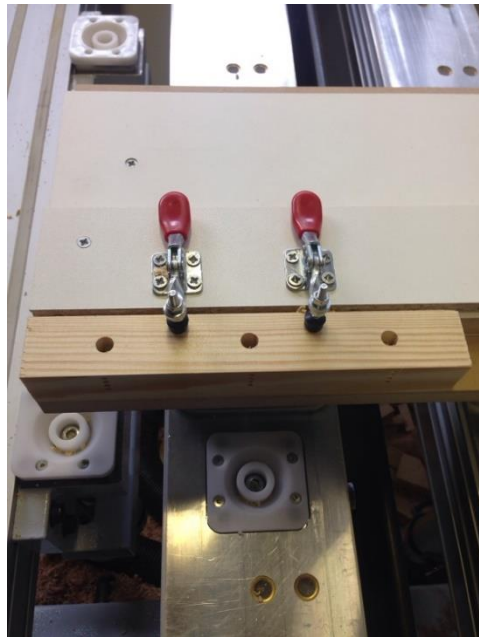
Slika 8. Ispitni uzorak bukovine

Za potrebe postavljanja ispitnih sonde izrađena su dodatna četiri provrta okomito na provrte moždanika s međusobnom udaljenošću od 4 mm (Slika 9.).



Slika 9. Pozicija provrta za ispitne sonde

Bušenje provrta na uzorcima izvršeno je pomoću CNC stroja spiralnim svrdlom od čelika oznake HSS promjera 8,1 mm (bušenje provrta moždanika) i spiralnim glodalom 3 x 12 x 60 mm (bušenje provrta za mjerne sonde) (Slika 10. i 11.).



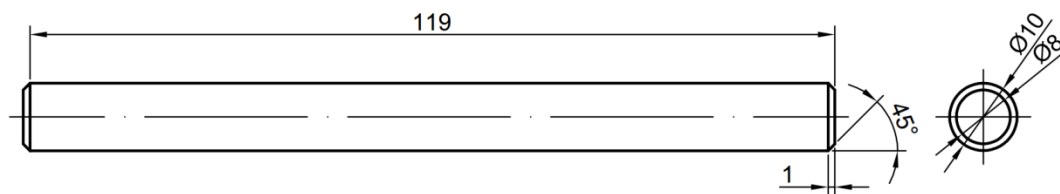
Slika 10. Bušenje provrta za moždanike na uzorku borovine



Slika 11. Bušenje provrta za mjerne sonde na uzorku borovine

3.2.3. Priprema moždanika

Moždanici su izrađeni iz glatkih drvenih bukovih štapova duljine 1000 mm, promjera 10 mm. Za potrebe istraživanja, štapovi su prikraćivani na duljinu od 120 mm koji će se koristiti kod ispitivanja. Naknadno su rubovi skošeni za 1 mm pod kutem od 45° (Slika 12 i 13) kako bi se omogućio lakši početak zavarivanja.



Slika 12. Dimenzija moždanika potrebnog za ispitivanje

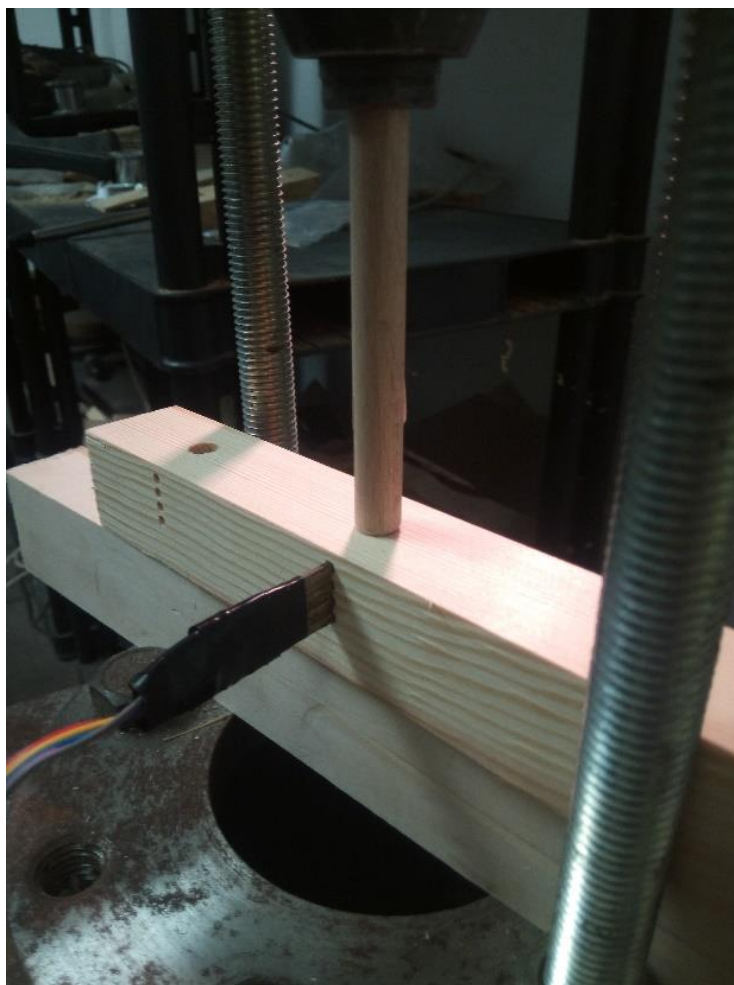


Slika 13. Bukovi moždanik korišten kod rotacijskog zavarivanja drva

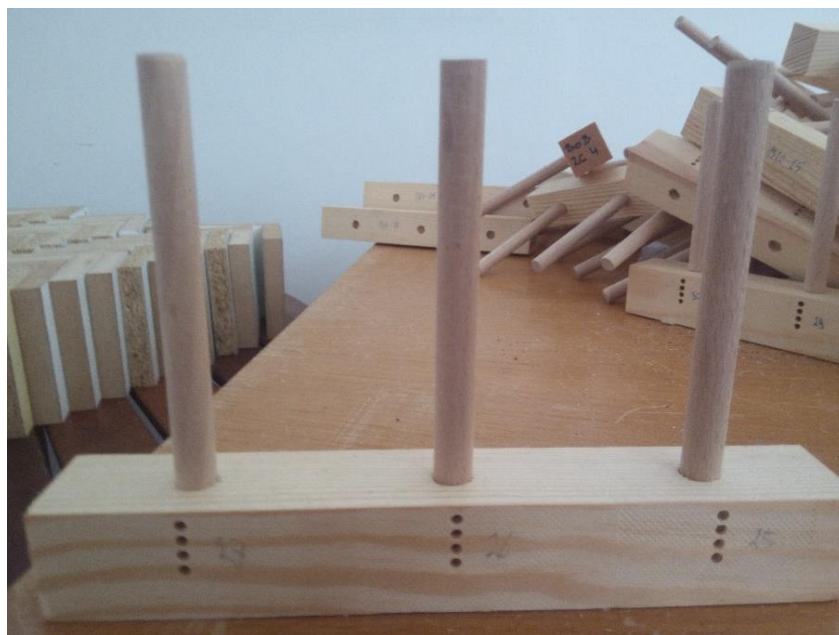
3.3. Izrada ispitnih proba

Zavarivanje proba je provedeno u klima komori je temperatura zraka iznosila 23 ± 2 °C, a relativna vlaga zraka $55 \pm 5\%$.

Zavarivanje uzoraka (Slika 14.) je izvršeno pomoću uređaja za zavarivanje koji ima mogućnost rotacije moždanika. Zavarivanje je vršeno tako što je moždanik rotirao određenom frekvencijom vrtnje. Frekvencija vrtnje tijekom zavarivanja iznosila je 865 i 1520 min⁻¹. Proces trajanja zavarivanja moždanika u uzorak trajao je 4 s (bez obzira na dubinu zavarivanja), a pritisak na moždanik nakon zavarivanja je trajao 3 – 5 s. Promjer provrta na uzorku iznosio je 8 mm, a promjer moždanika 10 mm, a sukladno tome dimenzije zadora iznose 2 mm. Dubina zavarivanja je iznosila 20 i 25 mm. Uzorak u koji se zavarivao moždanik bio je statičan. Na slici 15 prikazan je ispitni uzorak spreman za daljnje ispitivanje.



Slika 14. Zavarivanje uzoraka



Slika 15. Zavarena proba

Zavareno je ukupno 240 uzoraka, a od toga 120 u podlogu od bukovine i 120 u bazu borovine.

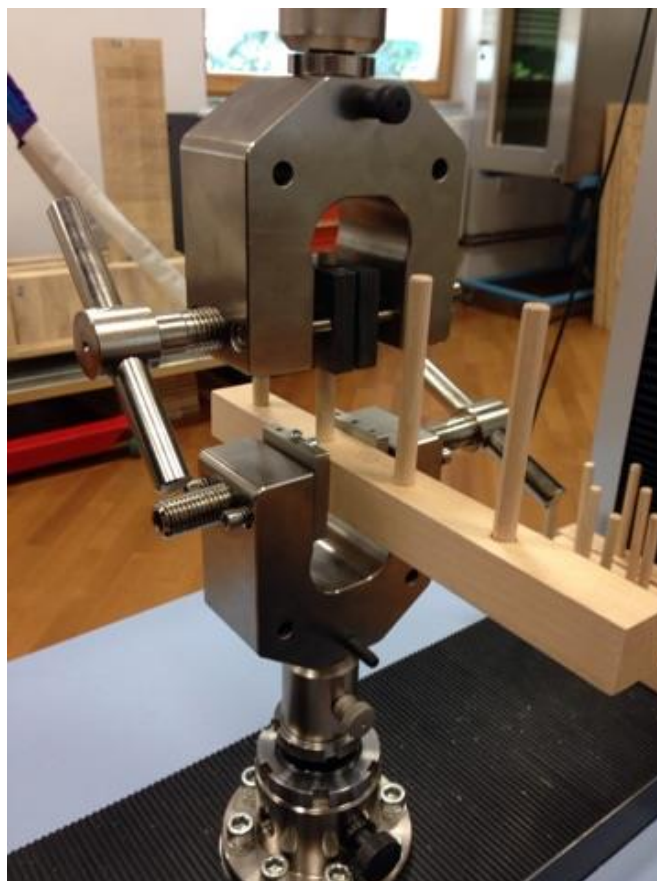
Zavareno je po 30 uzoraka za svaku kombinaciju frekvencije i dubine:

- frekvencijom vrtnje 865 min^{-1} na dubinu od 20mm;
- frekvencijom vrtnje 865 min^{-1} na dubinu od 25 mm;
- frekvencijom vrtnje 1520 min^{-1} na dubinu od 20 mm;
- frekvencijom vrtnje 1520 min^{-1} na dubinu od 25 mm.

3.4. Način ispitivanja

Ispitivanje je provedeno na računalno upravljanoj kitalici marke Shimadzu AG-X 100 KN. Pomoću izmjera (dobivenih na kitalici) mogu se dobiti rezultati Hookovog dijagrama. Najznačajnije karakteristike kitalice su: mjerno područje (do 100 KN), mogućnost ispitivanja na vlak, tlak i savijanje, mogućnost ispitivanja pločastih uzoraka od 0-21 mm (100/50 KN) i okruglih uzoraka-D24 (100/50 KN). Zbog specifičnosti ispitivanja za kitalicu je izrađen poseban nastavak kojim je omogućen prihvat moždanika moždanici, te pomoću njega ne dolazi do proklizavanja i ispitivanje se može nesmetano izvršiti (Slika 16 i 17). Tako prilagođena kitalica omogućuje da os simetrane uzorka bude paralelna s osi simetrane kitalice na kojoj djeluje sila. Za vrijeme ispitivanja pomak na kitalici je iznosio 5 mm/min.

Priprema, kondicioniranje, izrada uzoraka, te ispitivanje provedeno je na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu na Zavodu za namještaj i drvene proizvode.



Slika 16. Način pričvršćivanja uzorka za kidalicu



Slika 17. Ispitani uzorak

4. ANALIZA I PRIKAZ ISTRAŽIVANJA

Svojstva zavarenog spoja utvrđena su mjerenjem izvlačne sile moždanika iz uzorka. Svi podatci istraživanja obrađeni su u programima *Microsoft Excel 2016* i *Statistica*.

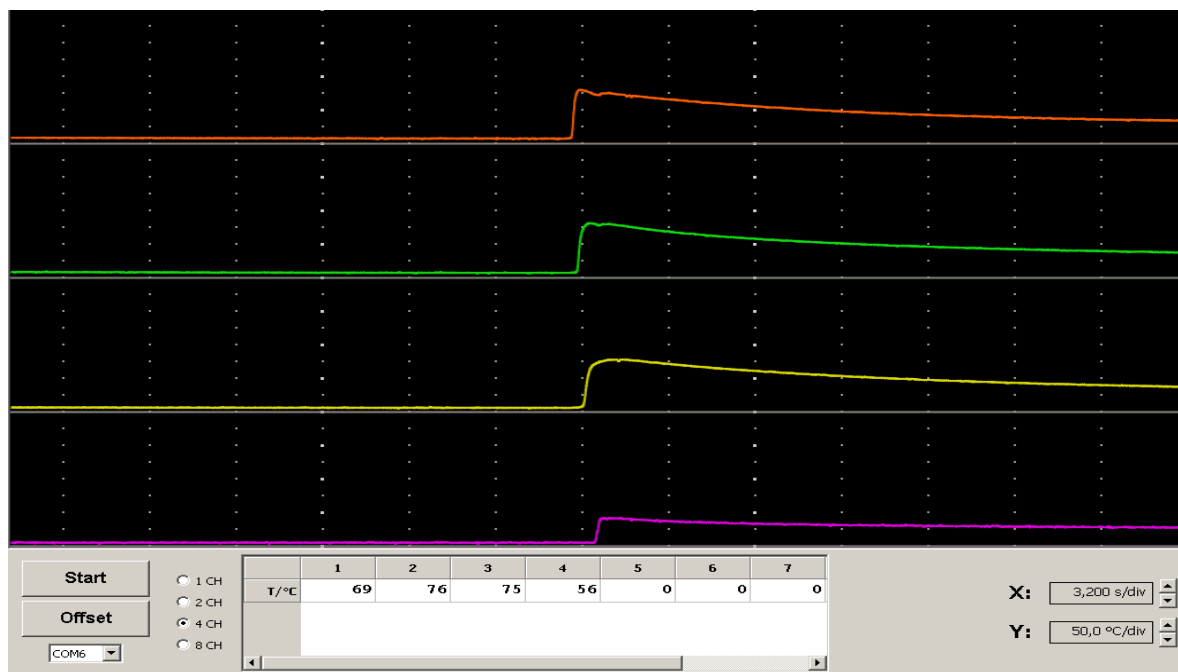
Statistička obrada rezultata ovisiti će o tome dali su dobiveni rezultati parametrijski ili neparametrijski. Tako će ukoliko su rezultati parametrijski obuhvaćati izračunavanje analitičke sredine, broj uzoraka, minimuma, maksimuma, standardne devijacije, homogenost i analizu varijance, post hoc test i izradu grafikona za ispitivane uzorke. Dok za neparametrijske rezultate obuhvaćati će izračunavanje analitičke sredine, broj uzoraka, minimuma, maksimuma, standardne devijacije, varijance, vrijednosti Q25, vrijednosti Q75, medijan, homogenost varijance, višestruku usporedbu (Kruskal – Wallis test), post hoc test i izradu grafikona za ispitivane uzorke.

Uzorci su označavani prema tablici 5.

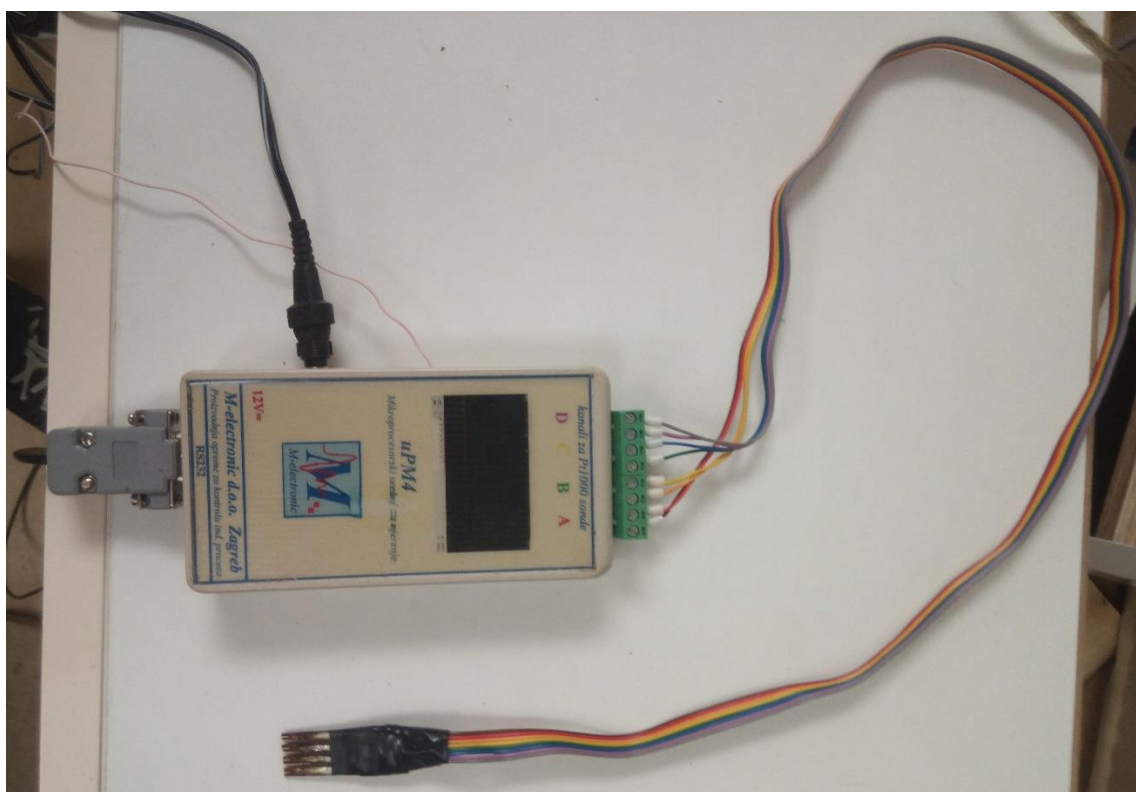
Tablica 5. Oznaka uzoraka

Oznaka uzorka	Vrsta drva	Frekvencija vrtnje (min^{-1})	Dubina zavarivanja (mm)
BO_865_20_x	Borovina	865	20
BO_1520_20_x	Borovina	1520	20
BO_865_25_x	Borovina	865	25
BO_1520_25_x	Borovina	1520	25
BU_865_20_x	Bukovina	865	20
BU_1520_20_x	Bukovina	1520	20
BU_865_25_x	Bukovina	865	25
BU_1520_25_x	Bukovina	1520	25
x- predstavlja redni broj zavarenog moždanika (1-30)			

Prilikom zavarivanja korišten je program izrađen isključivo po namjeni za ovaj tip istraživanja. Korišten je softver izrađen od strane tvrtke M-electronic koji bilježi trenutnu temperaturu (Slika 18) te ispisuje u obliku grafa u stvarnom vremenu. Zbog nedostatka u softveru iznosi maksimalne temperature očitani su uz pomoć Acrobat Reader DC-a kod kojeg je moguća greška u iščitavanju $\pm 1,5$ °C. Kod ispitivanja korištene su temperaturne sonde PT1000 s temperaturnim rasponom od -70 do +550 °C. Sonde su klase B s mogućom greškom od 0,3% (Slika 18. i 19.).



Slika 18. Program mjerenja temperature



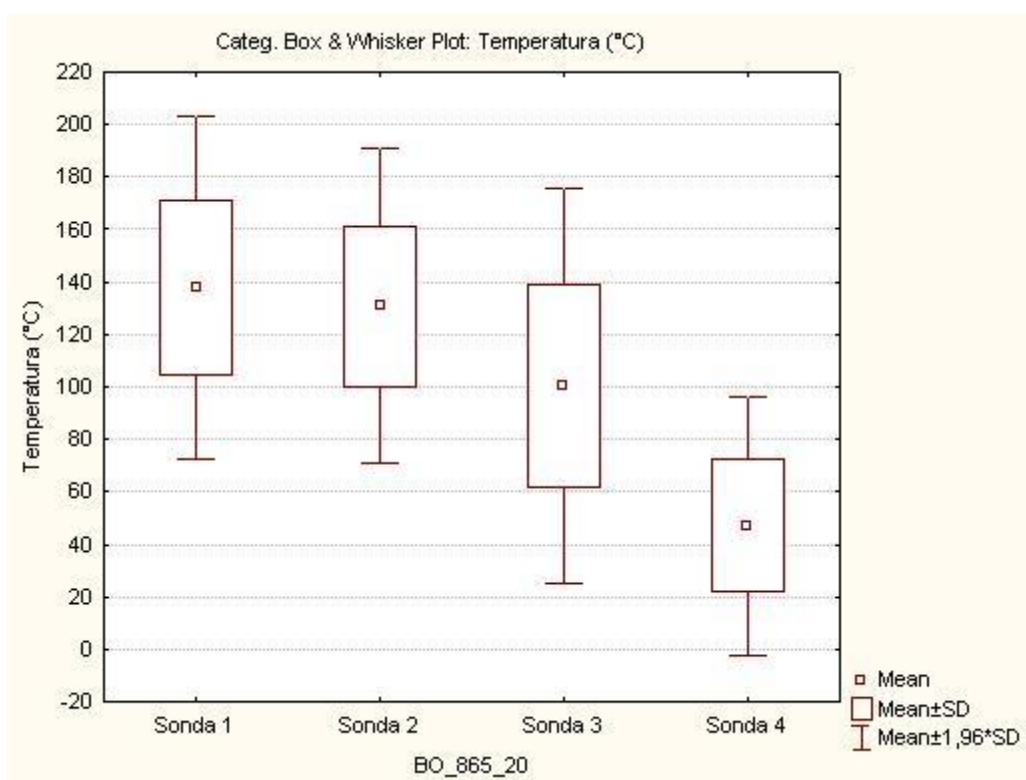
Slika 19. Temperature sonde

4.1. Utjecaj temperature na grupe uzoraka

4.1.1. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima borovine kod 865 min^{-1} zavareni na dubinu u iznosu od 20 mm dubine

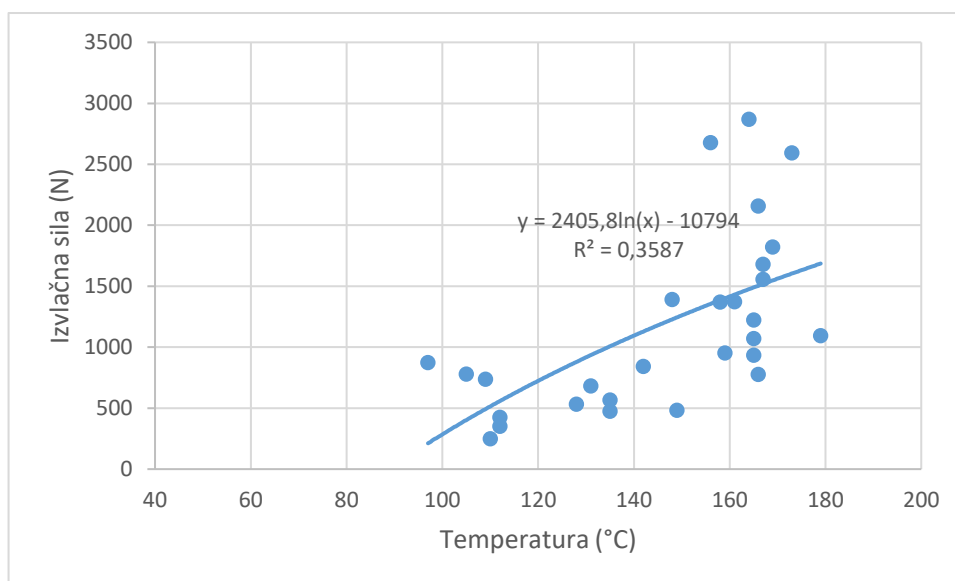
Kod istraživanja su korišteni glatki bukovi moždanici promjera 10 mm vareni okomito na smjer vlakanaca na dubinu od 20 mm. Temperatura je mjerena u četiri zone po dubini provrta. Baza uzoraka je iz borovine, a frekvencija vrtnje iznosila je 865 min^{-1} .

Sonda najbliža površini (sonda 1) postiže prosječno najvišu temperaturu od 146°C zbog trenja prilikom ulaska moždanika u bazu uzorka, dok sonda 2 postiže statistički zanemarivu manju temperaturu koja je viša zato što dolazi do prijenosa topline s površine i a moždanika. Sonda 4, udaljena 16 mm od površine, postiže najmanje temperature iz razloga što je moždanik zbog trenja smanjio zador i postiže najmanje prosječne temperature od 74°C (Slika 20.).



Slika 20. Prosječne temperature prema sondama (BO_865_20)

Na grafu 1 vidljivo je da porastom temperature raste i izvlačna sila. Prosječna izvlačna sila iznosi 1126 N sa standardnom devijacijom od 696,5, dok prosječna maksimalna temperatura iznosi $146,2^\circ\text{C}$ sa standardnom devijacijom od 23,9. Maksimalna temperatura iznosila je 179°C , dok je maksimalna izvlačna sila iznosila 2871,3 N kod 164°C . Linijom trenda može se zaključiti kako se porastom temperature značajno povećava izvlačna sila. R – kvadrat linije trenda iznosi 0,3587 što pokazuje veliko rasipanje podataka.

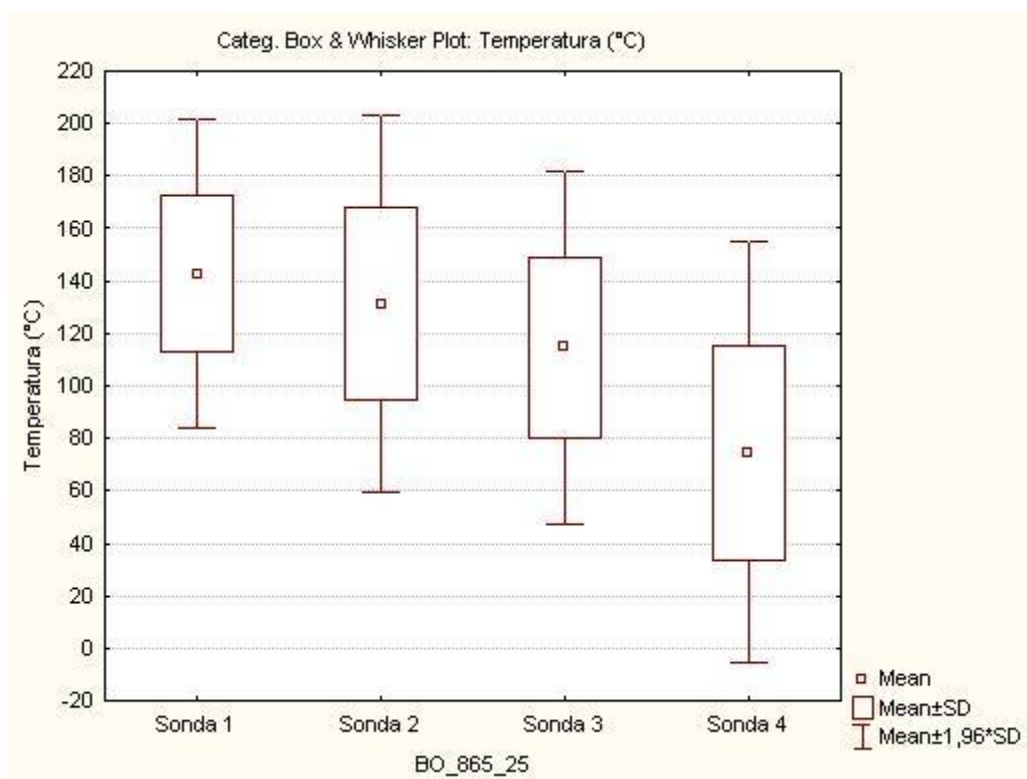


Graf 1. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BO_865_20)

4.1.2. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima borovine kod 865 min⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 25 mm dubine

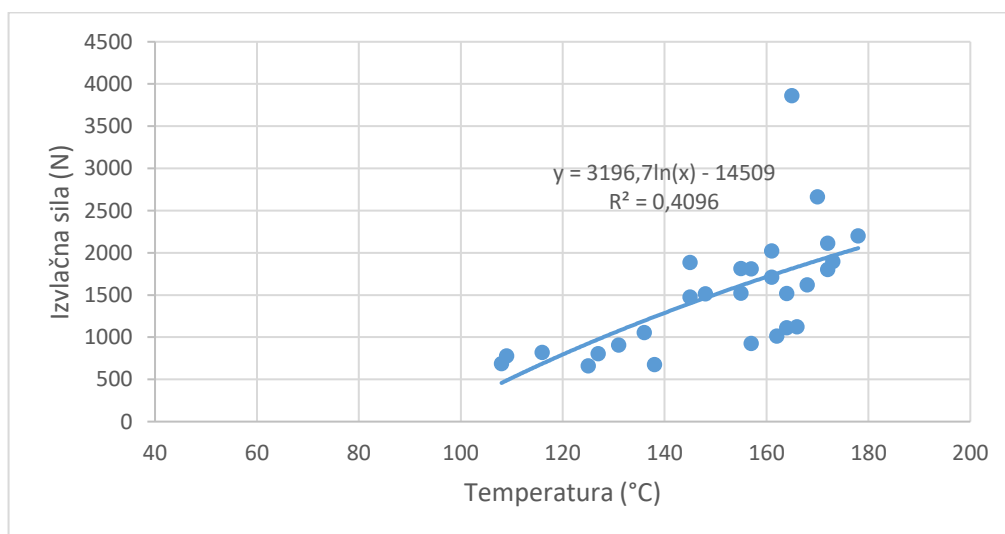
Istraživanje je provedeno s glatkim bukovim moždanicima promjera 10 mm varenim okomito na smjer vlakanaca na dubinu od 25 mm. Temperatura je mjerena u četiri zone po dubini provrta. Baza uzoraka je iz borovine, a frekvencija vrtnje iznosila je 865 min⁻¹.

Sonda najbliža površini (sonda 1) postiže prosječno najvišu temperaturu od 143 °C zbog trenja prilikom ulaska moždanika u bazu uzorka, dok sonda 2 postiže neznatno manju temperaturu koja je viša iz razloga što dolazi do prijenosa topline s površine i s moždanika. Sonda 4, udaljena 16 mm od površine, postiže najmanje temperature iz razloga što je moždanik zbog trenja smanjio zador i postiže najmanje prosječne temperature od 75 °C (Slika 21.).



Slika 21. Prosječne temperature prema sondama (BO_865_25)

Na grafu 2 vidljivo je da porastom temperature raste i izvlačna sila. Prosječna izvlačna sila iznosi 1464 N sa standardnom devijacijom od 691,4, dok prosječna maksimalna temperatura iznosi 151 °C sa standardnom devijacijom od 19,7. Maksimalna temperatura iznosila je 178 °C, dok je maksimalna izvlačna sila iznosila 3863 N kod 165 °C. Linijom trenda može se zaključiti kako se porastom temperature povećava izvlačna sila. R – kvadrat linije trenda iznosi 0,4096 što pokazuje srednje rasipanje podataka.

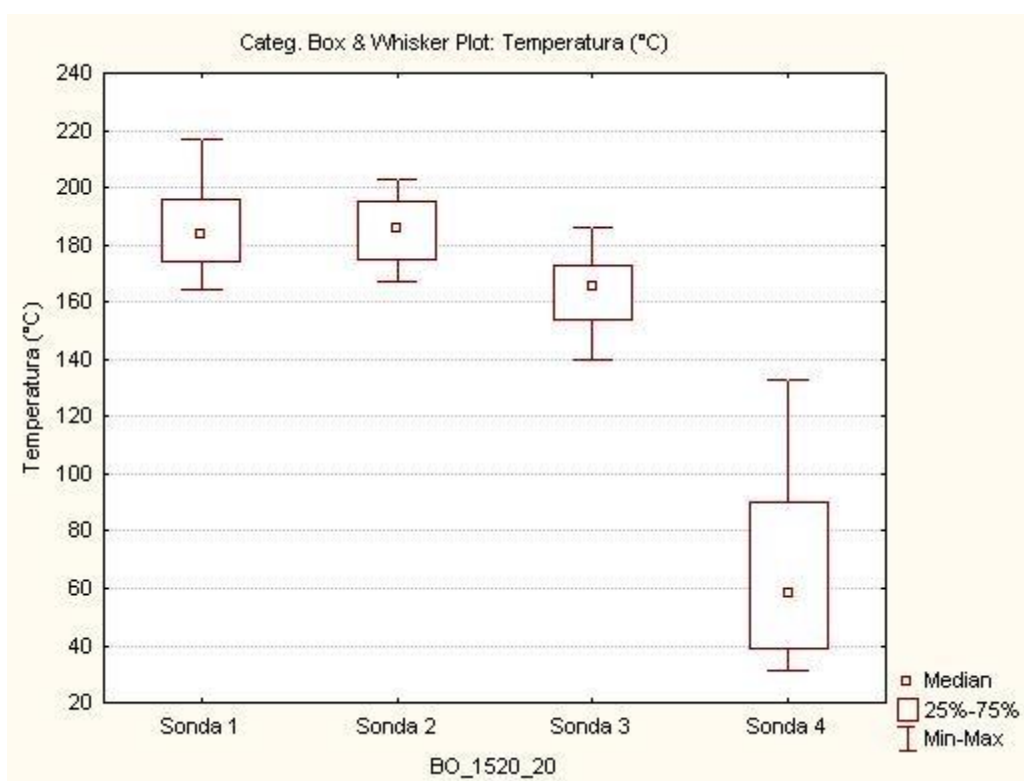


Graf 2. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BO_865_25)

4.1.3. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima borovine kod 1520 min⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 20 mm dubine

Istraživanje je provedeno s glatkim bukovim moždanicima promjera 10 mm zavarivanje okomito na smjer vlakanaca na dubinu od 20 mm. Temperatura je mjerena u četiri zone po dubini provrta. Baza uzoraka je iz borovine, a frekvencija vrtnje iznosila je 1520 min⁻¹.

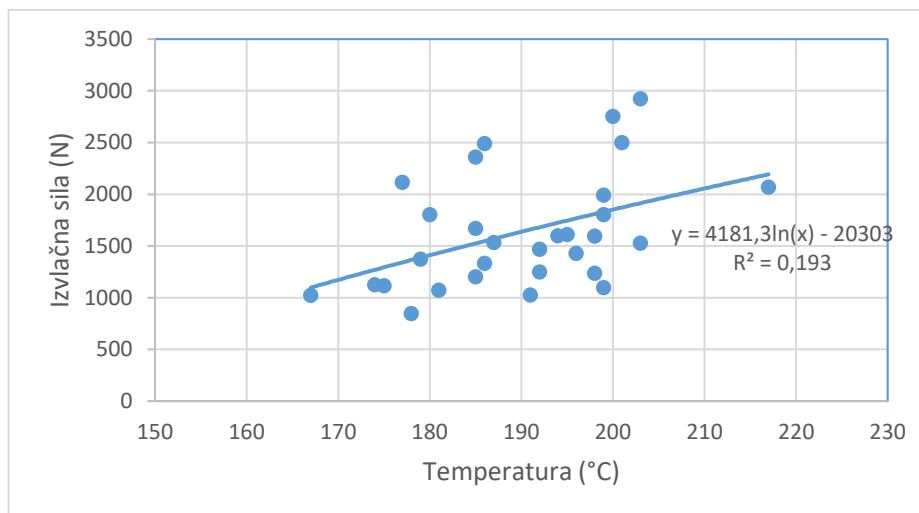
Sonda najbliža površini (sonda 1) postiže prosječnu temperaturu od 184 °C zbog trenja prilikom ulaska moždanika u bazu uzorka, dok sonda 2 postiže statistički zanemarivu višu prosječnu temperaturu koja je viša iz razloga što dolazi do prijenosa topline s površine i s moždanika (185 °C). Sonda 4, udaljena 16 mm od površine, postiže najmanje temperature iz razloga što je moždanik zbog trenja smanjio zador i postiže najmanje prosječne temperature od 68 °C (Slika 22.).



Slika 22. Prosječne temperature prema sondama (BO_1520_20)

Na grafu 3 vidljivo je da porastom temperature raste i izvlačna sila. Prosječna izvlačna sila iznosi 1631 N sa standardnom devijacijom od 540,8, dok prosječna maksimalna temperatura iznosi 190 °C sa standardnom devijacijom od 10,8. Maksimalna temperatura iznosila je 217 °C, dok je maksimalna izvlačna sila iznosila 2925 N kod 203 °C. Linijom trenda može se zaključiti kako se porastom temperature

značajno povećava izvlačna sila. R – kvadrat linije trenda iznosi 0,193 što pokazuje veliko rasipanje podataka.

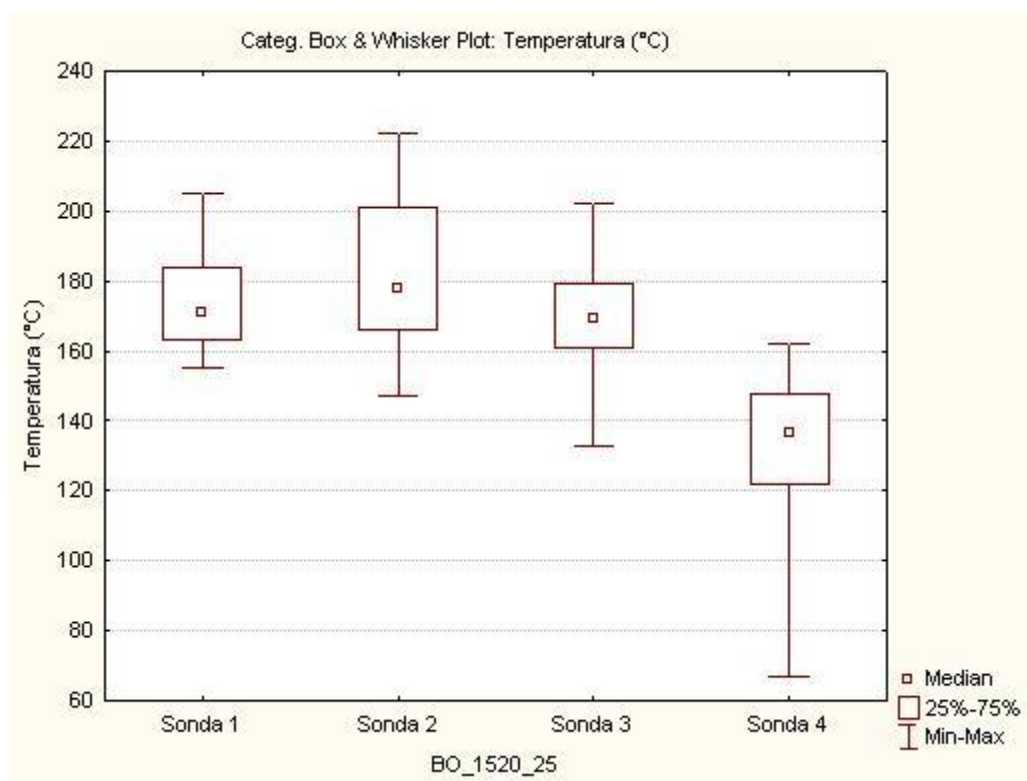


Graf 3. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BO_1520_20)

4.1.4. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima borovine kod 1520 min⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 25 mm dubine

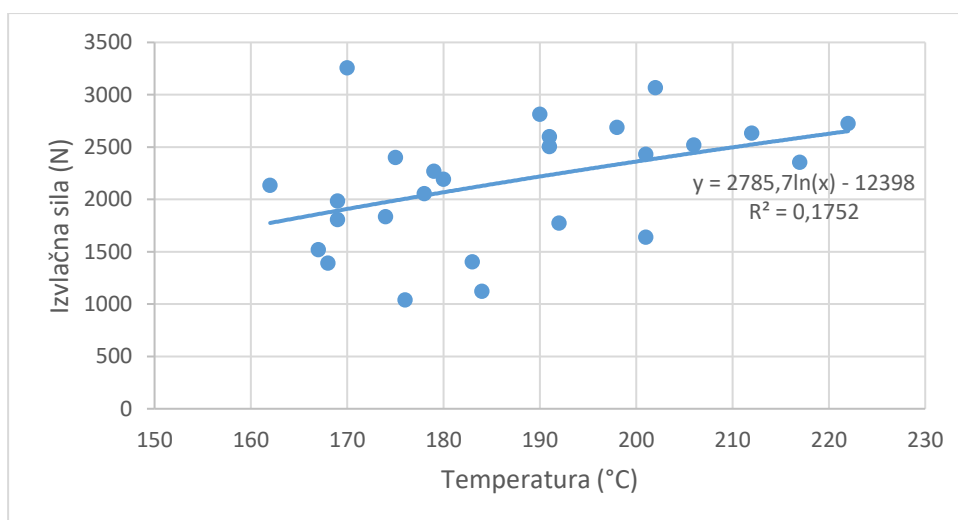
Istraživanje je provedeno s glatkim bukovim moždanicima promjera 10 mm varenim okomito na smjer vlakanaca na dubinu od 25 mm. Temperatura je mjerena u četiri zone po dubini provrta. Baza uzoraka je iz borovine, a frekvencija vrtnje iznosila je 1520 min⁻¹.

Sonda najbliža površini (sonda 1) postiže prosječnu temperaturu od 174 °C zbog trenja prilikom ulaska moždanika u bazu uzorka, dok sonda 2 postiže neznatno višu prosječnu temperaturu koja je viša iz razloga što dolazi do prijenosa topline s površine i s moždanika (182 °C). Razlika u temperaturnim vrijednostima između sonde 1, 2 i 3 je statistički neznačajna. Sonda 4, udaljena 16 mm od površine, postiže najmanje temperature iz razloga što je moždanik zbog trenja smanjio zador postiže najmanje prosječne temperature od 132,2 °C (Slika 23.).



Slika 23. Prosječne temperature prema sondama (BO_1520_25)

Na grafu 4 vidljivo je da porastom temperature raste i izvlačna sila. Prosječna izvlačna sila iznosi 1987 N sa standardnom devijacijom od 761, dok prosječna maksimalna temperatura iznosi 188 °C sa standardnom devijacijom od 16,6. Maksimalna temperatura iznosila je 222 °C, dok je maksimalna izvlačna sila iznosila 3256,6 N kod 170 °C. Linijom trenda može se zaključiti kako se porastom temperature načajno povećava izvlačna sila. R – kvadrat linije trenda iznosi 0,1752 što pokazuje veliko rasipanje podataka.

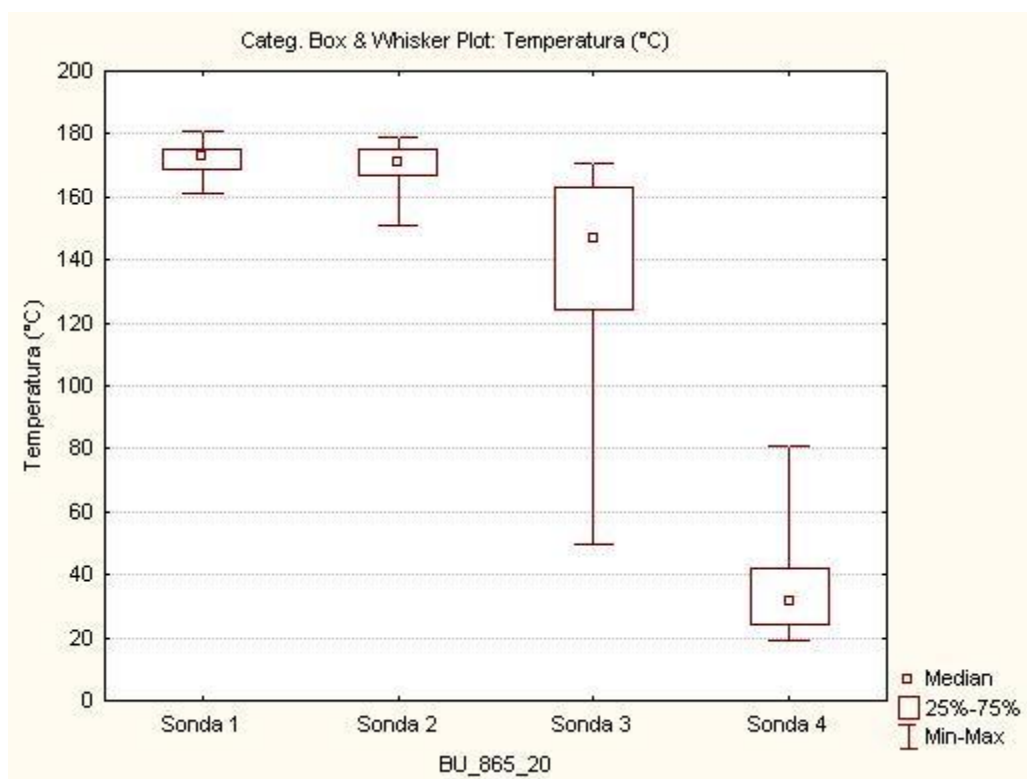


Graf 4. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BO_1520_25)

4.1.5. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima bukovine kod 865 min⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 20 mm dubine

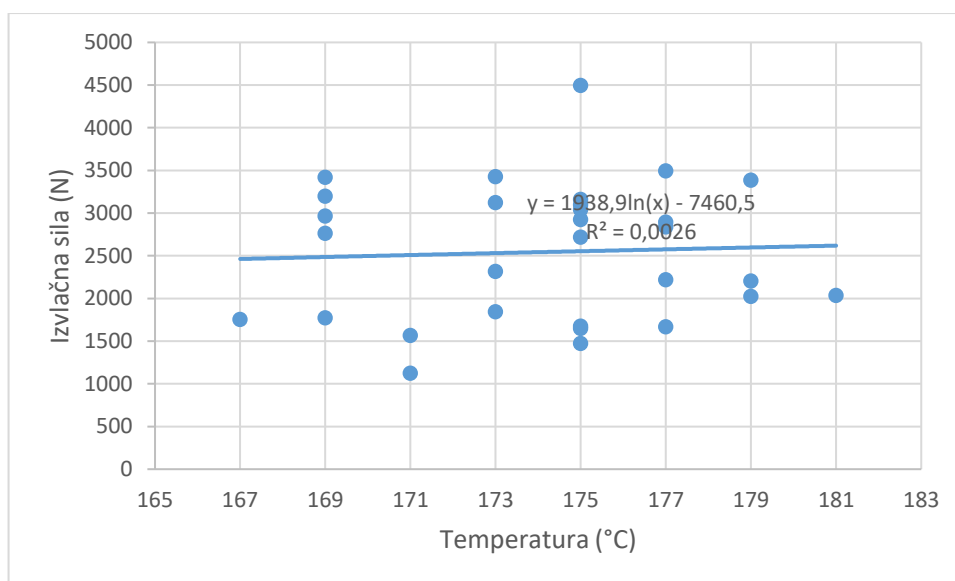
Istraživanje je provedeno s glatkim bukovim moždanicima promjera 10 mm varenim okomito na smjer vlakanaca na dubinu od 20 mm. Temperatura je mjerena u četiri zone po dubini provrta. Baza uzoraka je iz bukovine, a frekvencija vrtnje iznosila je 865 min⁻¹.

Sonda najbliže površini (sonda 1) postiže najvišu prosječnu temperaturu od 172 °C zbog trenja prilikom ulaska moždanika u bazu uzorka, dok sonda 2 postiže statistički nevažnu manju prosječnu temperaturu koja je viša iz razloga što dolazi do prijenosa topline s površine i s moždanika (170 °C). Sonda 4, udaljena 16 mm od površine, postiže najmanje temperature iz razloga što je moždanik zbog trenja smanjio zador postiže najmanje prosječne temperature od 34,7 °C (Slika 24.).



Slika 24. Prosječne temperature prema sondama (BU_865_20)

Na grafu 5 vidljivo je da blagi porast temperature povećava izvlačnu silu. Prosječna izvlačna sila iznosi 2543,6 N sa standardnom devijacijom od 779,5, dok prosječna maksimalna temperatura iznosi 174 °C sa standardnom devijacijom od 3,5. Maksimalna temperatura iznosila je 222 °C, dok je maksimalna izvlačna sila iznosila 4498,7 N kod 175 °C. Linijom trenda može se zaključiti kako se porastom temperature blago povećava izvlačna sila. R – kvadrat linije trenda iznosi 0,0026 što pokazuje veliko rasipanje podataka.

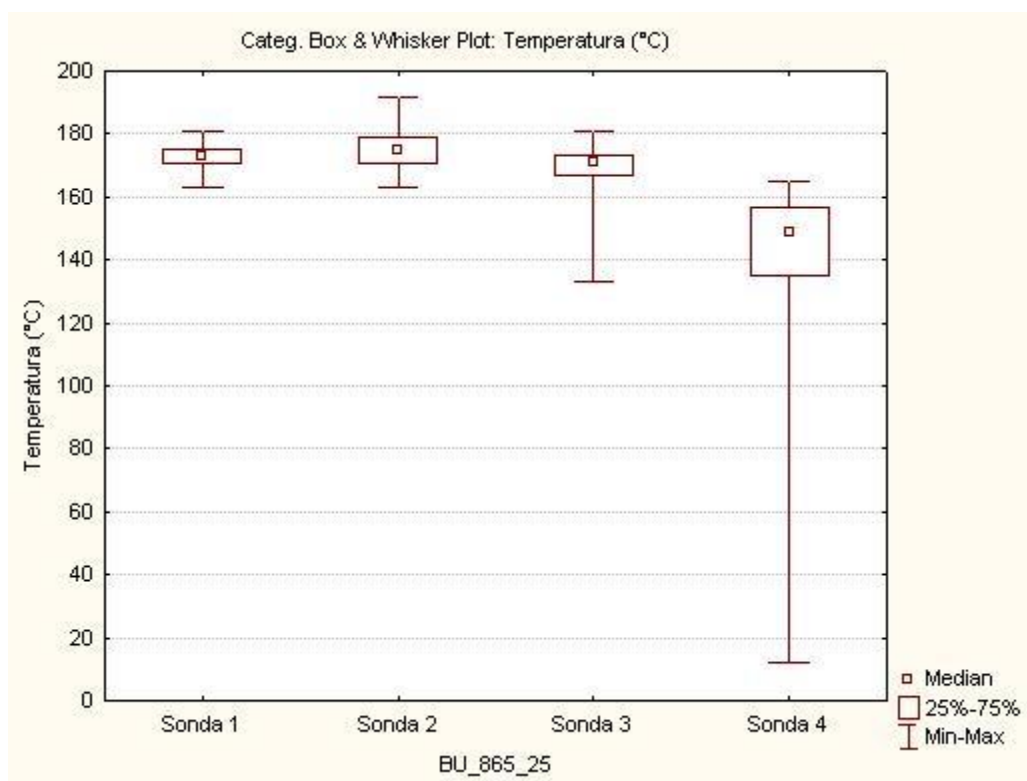


Graf 5. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BU_865_20)

4.1.6. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima bukovine kod 865 min⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 25 mm dubine

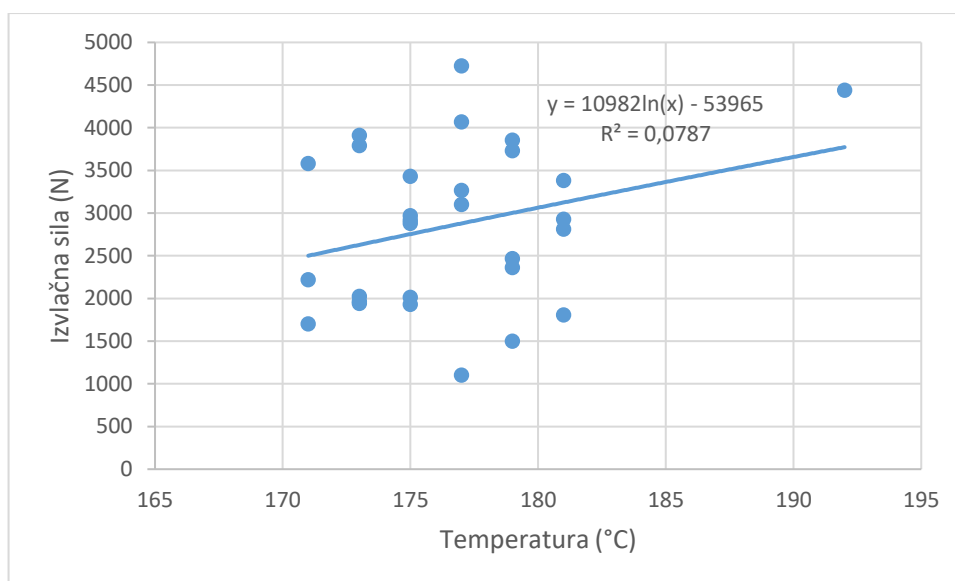
Istraživanje je provedeno s glatkim bukovim moždanicima promjera 10 mm varenim okomito na smjer vlakanaca na dubinu od 25 mm. Temperatura je mjerena u četiri zone po dubini provrta. Baza uzoraka je iz bukovine, a frekvencija vrtnje iznosila je 865 min⁻¹.

Sonda najbliže površini (sonda 1) postiže prosječnu temperaturu od 173,5 °C zbog trenja prilikom ulaska moždanika u bazu uzorka, dok sonda 2 postiže neznatno višu prosječnu temperaturu koja je viša iz razloga što dolazi do prijenosa topline s površine i s moždanika (175 °C). Između sonda 1, 2 i 3 ne postoji statistički značajna razlika. Sonda 4, udaljena 16 mm od površine, postiže najmanje temperature iz razloga što je moždanik zbog trenja smanjio zador postiže najmanje prosječne temperature od 138 °C (Slika 25.).



Slika 25. Prosječne temperature prema sondama (BU_865_25)

Na grafu 6 vidljivo je da porast temperature povećava izvlačna sila. Prosječna izvlačna sila iznosi 2857 N sa standardnom devijacijom od 921,7, dok prosječna maksimalna temperatura iznosi 177 °C sa standardnom devijacijom od 4,2. Maksimalna temperatura iznosila je 192 °C, dok je maksimalna izvlačna sila iznosila 4724 N kod 177 °C. Zanimljivo je kako su najveći iznosi izvlačne sile upravo kod 177 °C. Linijom trenda može se zaključiti kako se porastom temperature blago povećava izvlačna sila. R – kvadrat linije trenda iznosi 0,0787 što pokazuje veliko rasipanje podataka.

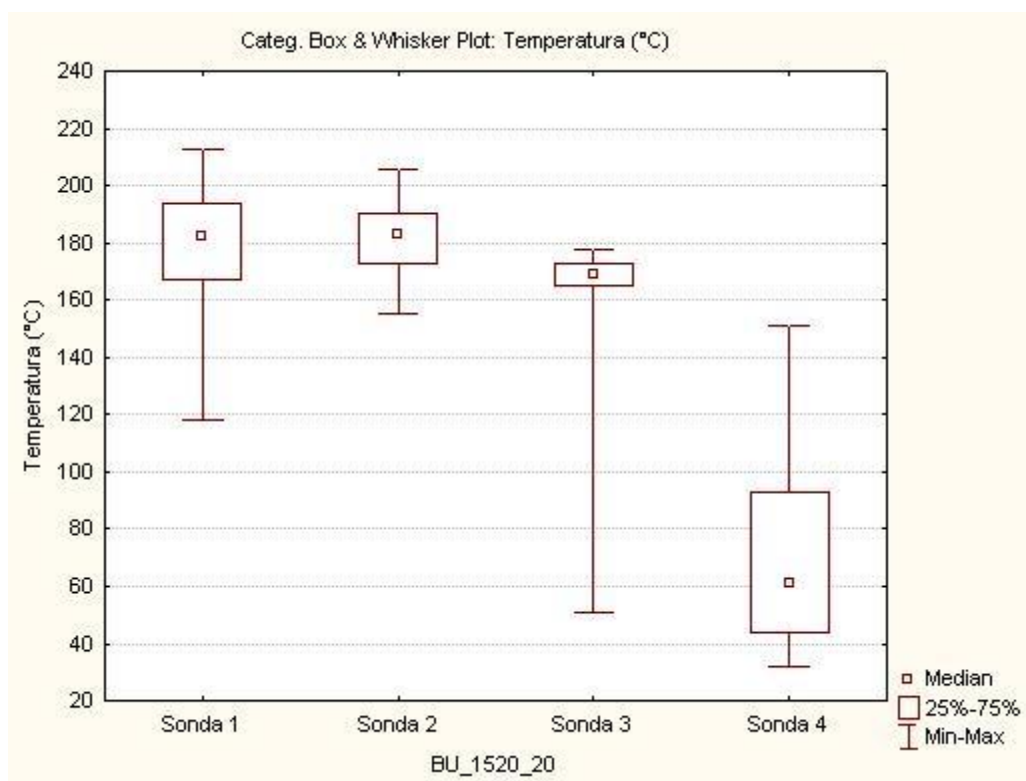


Graf 6. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BU_865_25)

4.1.7. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima bukovine kod 1520 min^{-1} zavareni na dubinu u iznosu od 20 mm dubine

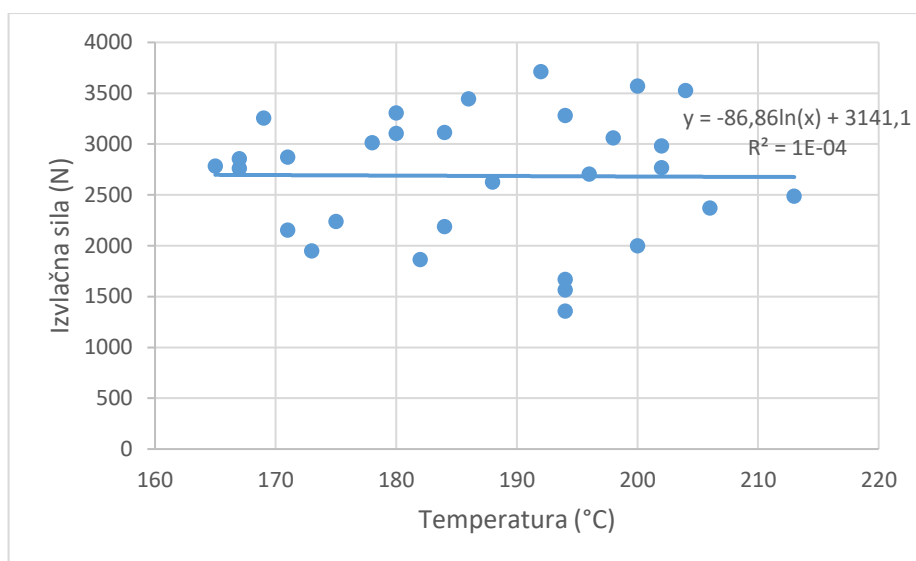
Istraživanje je provedeno s glatkim bukovim moždanicima promjera 10 mm varenim okomito na smjer vlakanaca na dubinu od 20 mm. Temperatura je mjerena u četiri zone po dubini provrta. Baza uzoraka je iz bukovine, a frekvencija vrtnje iznosila je 1520 min^{-1} .

Sonda najbliže površini (sonda 1) postiže prosječnu temperaturu od $180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ zbog trenja prilikom ulaska moždanika u bazu uzorka, dok sonda 2 postiže neznatno višu prosječnu temperaturu koja je viša iz razloga što dolazi do prijenosa topline s površine i s moždanika ($182 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Između sonda 1, 2 i 3 ne postoji statistički značajna razlika. Sonda 4, udaljena 16 mm od površine, postiže najmanje temperature iz razloga što je moždanik zbog trenja smanjio zador postiže najmanje prosječne temperature od $69,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Slika 26.).



Slika 26. Prosječne temperature prema sondama (BU_1520_20)

Na grafu 7 vidljivo je da se porastom temperature iznad 200 °C izvlačna sila smanjuje što se pripisuje grešci uređaja za ispitivanje. Prosječna izvlačna sila iznosi 2686,9 N sa standardnom devijacijom od 621,2, dok prosječna maksimalna temperatura iznosi 187 °C sa standardnom devijacijom od 13,2. Maksimalna temperatura iznosila je 213 °C, dok je maksimalna izvlačna sila iznosila 3711,7 N kod 192 °C. Linijom trenda može se zaključiti kako se porastom temperature blago povećava izvlačna sila, dok nakon 200 °C počinje opadati. R – kvadrat linije trenda iznosi 0,0001 (10^{-4}) što pokazuje veliko rasipanje podataka.

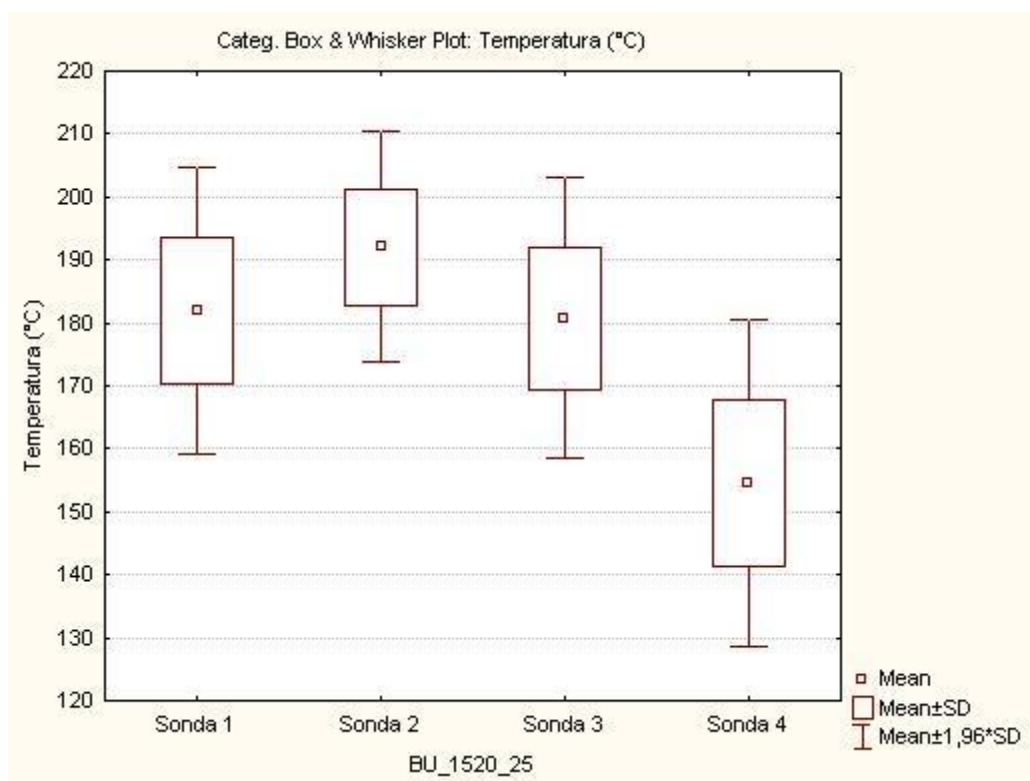


Graf 7. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BU_865_20)

4.1.8. Utjecaj temperature na iznos izvlačne sile na uzorcima bukovine kod 1520 min⁻¹ zavareni na dubinu u iznosu od 25 mm dubine

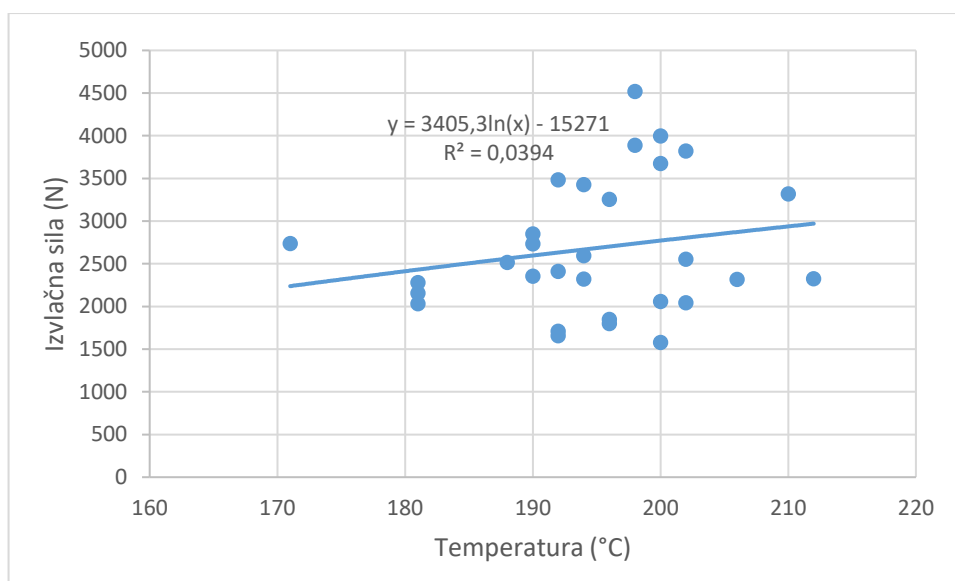
Istraživanje je provedeno s glatkim bukovim moždanicima promjera 10 mm varenim okomito na smjer vlaknaca na dubinu od 25 mm. Temperatura je mjerena u četiri zone po dubini provrta. Baza uzoraka je iz bukovine, a frekvencija vrtnje iznosila je 1520 min⁻¹.

Sonda najbliže površini (sonda 1) postiže prosječnu temperaturu od 182 °C zbog trenja prilikom ulaska moždanika u bazu uzorka, dok sonda 2 postiže višu prosječnu temperaturu koja je viša iz razloga što dolazi do prijenosa topline s površine i s moždanika (192 °C). Sonda 4, udaljena 16 mm od površine, postiže najmanje temperature iz razloga što je moždanik zbog trenja smanjio zador postiže najmanje prosječne temperature od 154 °C (Slika 27.).



Slika 27. Prosječne temperature prema sondama (BU_1520_25)

Na grafu 8 vidljivo je da porast temperature povećava izvlačnu silu. Prosječna izvlačna sila iznosi 2676 N sa standardnom devijacijom od 769,9, dok prosječna maksimalna temperatura iznosi 195 °C sa standardnom devijacijom od 8,6. Maksimalna temperatura iznosila je 212 °C, dok je maksimalna izvlačna sila iznosila 4521 N kod 198 °C. Linijom trenda može se zaključiti kako se porastom temperature povećava izvlačna sila. R – kvadrat linije trenda iznosi 0,0394 što pokazuje veliko rasipanje podataka.



Graf 8. Utjecaj temperature na izvlačnu silu (BU_1520_25)

4.2. Usporedba rezultata izvlačne sile uzoraka borovine

Tijekom ispitivanja uzorci borovine su podijeljeni u četiri skupine prema frekvenciji vrtnje i prema dubini zavarivanja. Tako razlikujemo uzorke borovine zavarene:

- frekvencijom vrtnje 865 min^{-1} na dubinu od 20 mm (BO_865_20),
- frekvencijom vrtnje 865 min^{-1} na dubinu od 25 mm (BO_865_25),
- zavarene frekvencijom vrtnje 1520 min^{-1} na dubinu od 20 mm (BO_1520_20) i
- frekvencijom vrtnje 1520 min^{-1} na dubinu od 25 mm (BO_1520_25).

Uzorci su zavareni prema u ranije navedenim uvjetima. Prema tome su uspoređivani rezultati izvlačnih sila nakon ispitivanja (Tablica 6).

Tablica 6. Rezultati izvlačne sile statističke obrade uzoraka borovine

Breakdown Table of Descriptive Statistics					
N = 120					
A	B Means	B N	B Std. Dev.	B Minimum	B Maximum
BO_865_20	1126,343	30	708,3986	248,8	2871,3
BO_865_25	1463,787	30	703,2149	660,6	3863
BO_1520_20	1631,83	30	550,0517	847,7	2925,3
BO_1520_25	1986,703	30	773,9805	93,6	3256,6
All Grps	1552,166	120	747,9354	93,6	3863
B – izvlačna sila (N)					

Utjecaj temperature zavarivanja na čvrstoću rotacijski zavarenog spoja

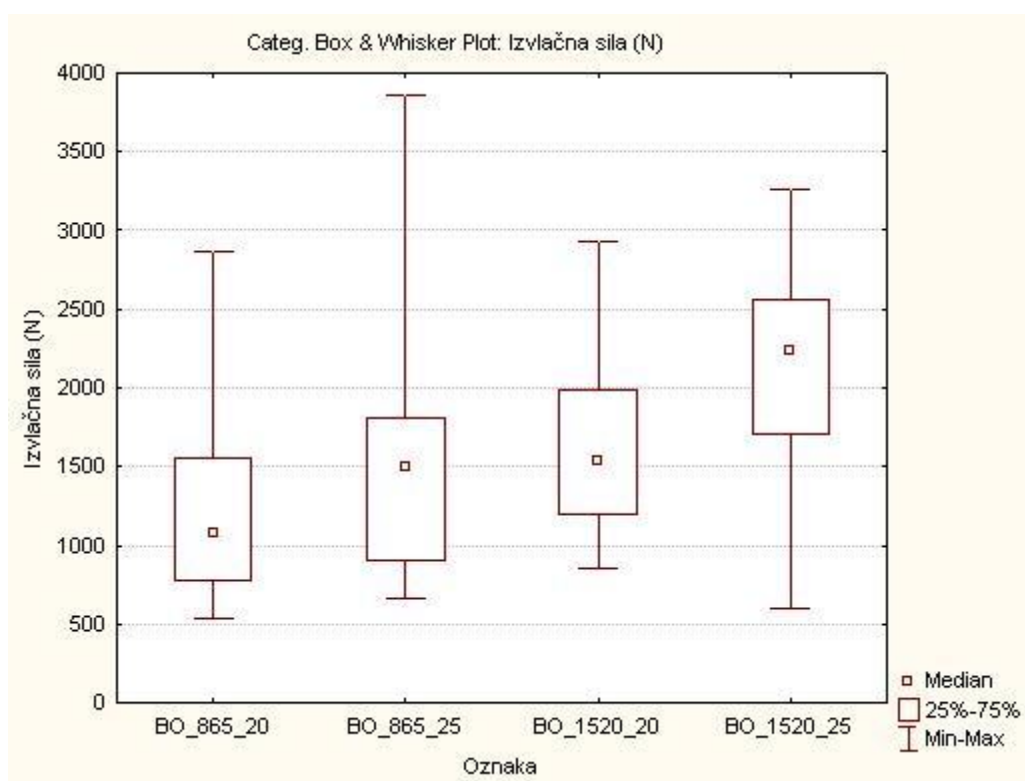
Valentino Slivar

Iz tablice 6. i slike 28. vidljiva je usporedba izvlačnih sila za tipove uzoraka borovine. Statističkom analizom utvrđeno je kako uzorci zavareni većom frekvencijom vrtnje (1520 min^{-1}) postižu prosječno veće iznose izvlačne sile. Međutim najveći iznos izvlačne sile postiže BO_865_25 (3863 N).

Prosječne izvlačne sile borovine iznose:

- BO_865_20 - 1126,343 N,
- BO_865_25 - 1463,787 N,
- BO_1520 - 1631,83 N,
- BO_1520_25 - 1986,703 N.

Statističkom analizom utvrđena je statistički značajna razlika između BO_865_20 s BO_1520_25, dok ne postoji statistički značajna razlika s BO_865_25 i BO_1520_20. Nadalje uzorci BO_865_25 se značajno razlikuju s BO_1520_25, dok ne postoji statistički značajna razlika s BO_1520_20. Između uzoraka BO_1520_20 i BO_1520_25 ne postoji statistički značajna razlika.



Slika 28. Usporedba izvlačnih sila borovine

4.3. Usporedba rezultata iznosa temperature zavarivanja uzoraka borovine

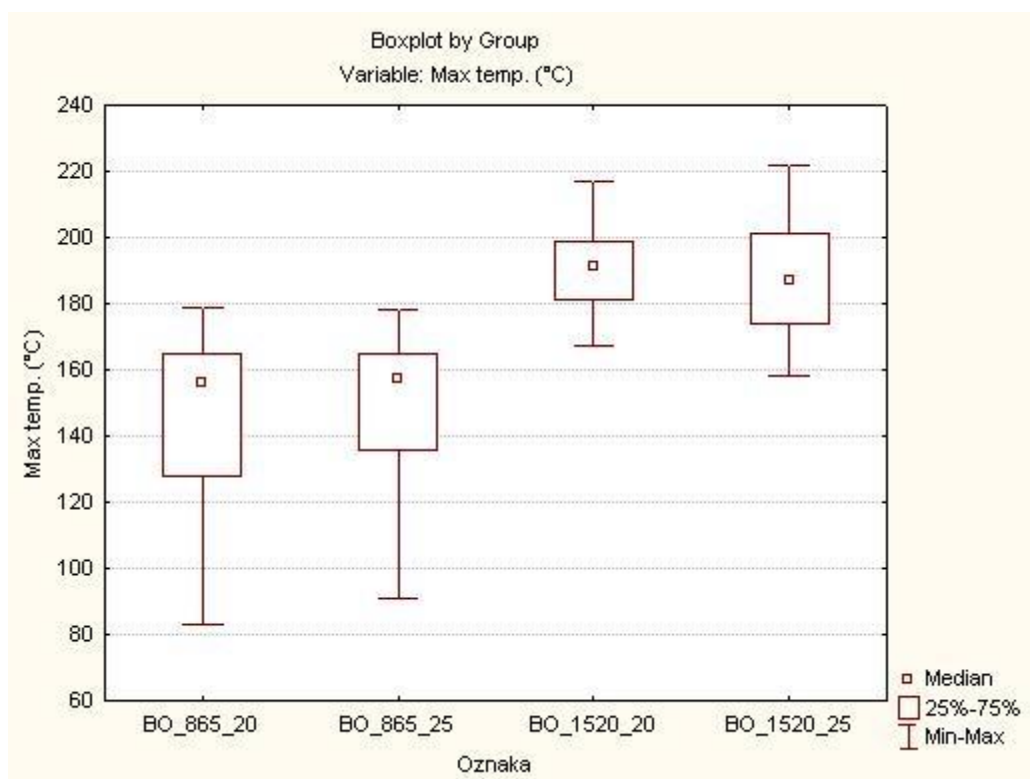
Kod ispitivanja korištene su temperaturne sonde klase B kako bi se s velikom točnošću odredila temperatura zavarivanja u spoju. Provedena je statistička analiza temperatura zavarivanja kod uzoraka borovine (Tablica 7).

Tablica 7. Rezultati temperature zavarivanja statističke obrade uzoraka borovine

Breakdown Table of Descriptive Statistics N = 118								
A	B Means	B N	B Std. Dev.	B Minimum	B Maximum	B Q25	B Median	B Q75
BO_865_20	144	29	26,59619	83	179	128	156	165
BO_865_25	148,93	29	22,65412	91	178	136	157	165
BO_1520_20	190,07	30	10,96368	167	217	181	191	199
BO_1520_25	187,27	30	17,16037	158	222	174	187	201
All Grps	167,92	118	29,11726	83	222	157	170	190
B – Temperatura (°C)								

Statističkom analizom rezultata ispitivanja utvrđeno je kako temperatura ovisi o frekvenciji vrtnje. Dakle, samim time veće iznose temperature postižu uzorci zavareni frekvencijom 1520 min⁻¹. Maksimalna temperatura kod uzoraka frekvencije vrtnje 1520 min⁻¹ (BO_1520_20 i BO_1520_25) iznosi oko 220 °C, dok kod uzoraka frekvencije vrtnje 865 min⁻¹ (BO_865_20 i BO_865_25) iznosi oko 180 °C. Prosječni iznosi temperatura zavarivanja kod 865 min⁻¹ neovisno o dubini zavarivanja iznosi oko 146 °C, dok kod 1520 min⁻¹ iznosi 189 °C.

Utvrđeno je kako ne postoji statistički značajna razlika između uzoraka iste frekvencije bez obzira na dubinu. Međutim, postoji statistički značajna razlika između uzoraka različite frekvencije (Slika 29.).



Slika 29. Usporedba temperatura zavarivanja borovine

4.4. Usporedba rezultata izvlačne sile uzoraka bukovine

Kao i kod uzoraka borovine, uzorci bukovine su podijeljeni u četiri skupine prema frekvenciji vrtnje i prema dubini zavarivanja. Razlikujemo uzorke bukovine zavarene:

- frekvencijom vrtnje 865 min^{-1} na dubinu od 20 mm (BU_865_20),
- frekvencijom vrtnje 865 min^{-1} na dubinu od 25 mm (BU_865_25),
- frekvencijom vrtnje 1520 min^{-1} na dubinu od 20 mm (BU_1520_20) i
- frekvencijom vrtnje 1520 min^{-1} na dubinu od 25 mm (BU_1520_25).

Nakon ispitivanja pristupilo se uspoređivanju rezultata izvlačne sile (Tablica 8).

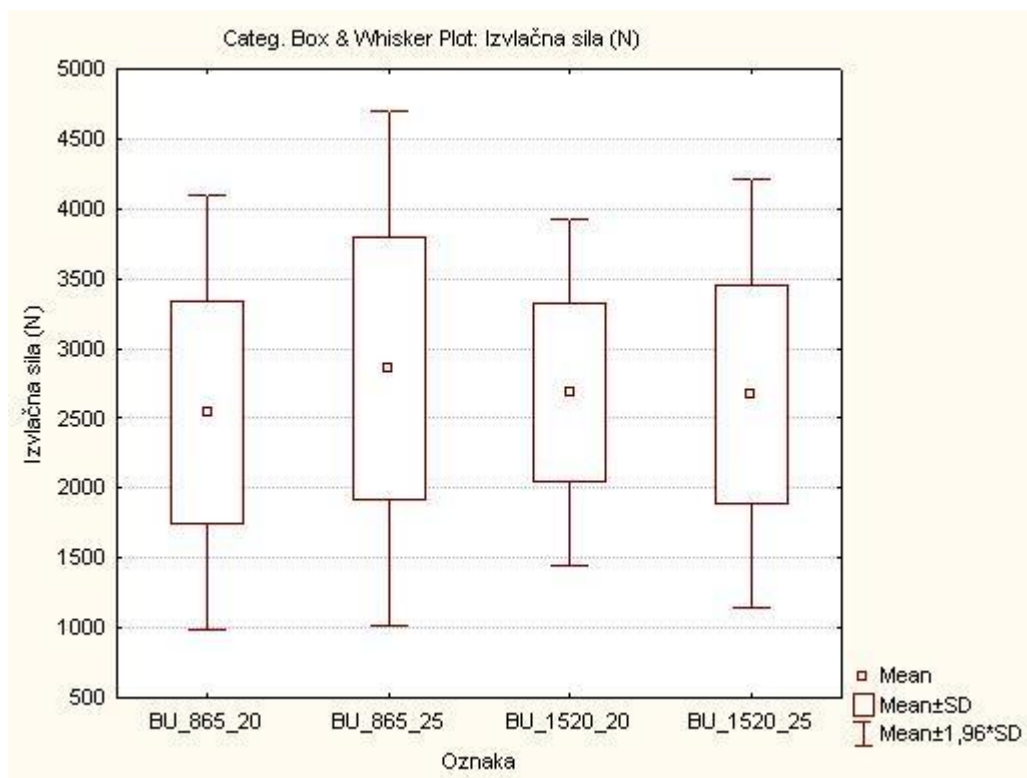
Tablica 8 Prikaz rezultata izvlačne sile statističke obrade uzoraka bukovine

Breakdown Table of Descriptive Statistics N = 120					
A	B Means	B N	B Std. Dev.	B Minimum	B Maximum
BU_865_20	2543,563	30	792,8169	1125,2	4498,7
BU_865_25	2857,021	29	937,9816	1102,1	4724
BU_1520_20	2686,927	30	631,8067	1357,5	3711,7
BU_1520_25	2676,443	30	783,0139	1579,1	4520,9
All Grps	2689,593	119	790,18	1102,1	4724
B – izvlačna sila (N)					

Prema tablici 8. i slici 30. vidljivo je usporedba izvlačnih sila za tipove uzoraka bukovine. Statističkom analizom utvrđeno je kako između skupina ne postoje statistički značajne razlike. BU_865_25 postiže najveću izvlačnu silu od 4724 N, te najveći prosječni iznos izvlačne sile (2857,021 N).

Prosječne izvlačne sile bukovine iznose:

- BU_865_20 - 2543,563 N,
- BU_865_25 – 2857,021 N,
- BU_1520_20 - 2686,927 N,
- BU_1520_25 - 2676,443 N.



Slika 30. Usporedba izvlačnih sila bukovine

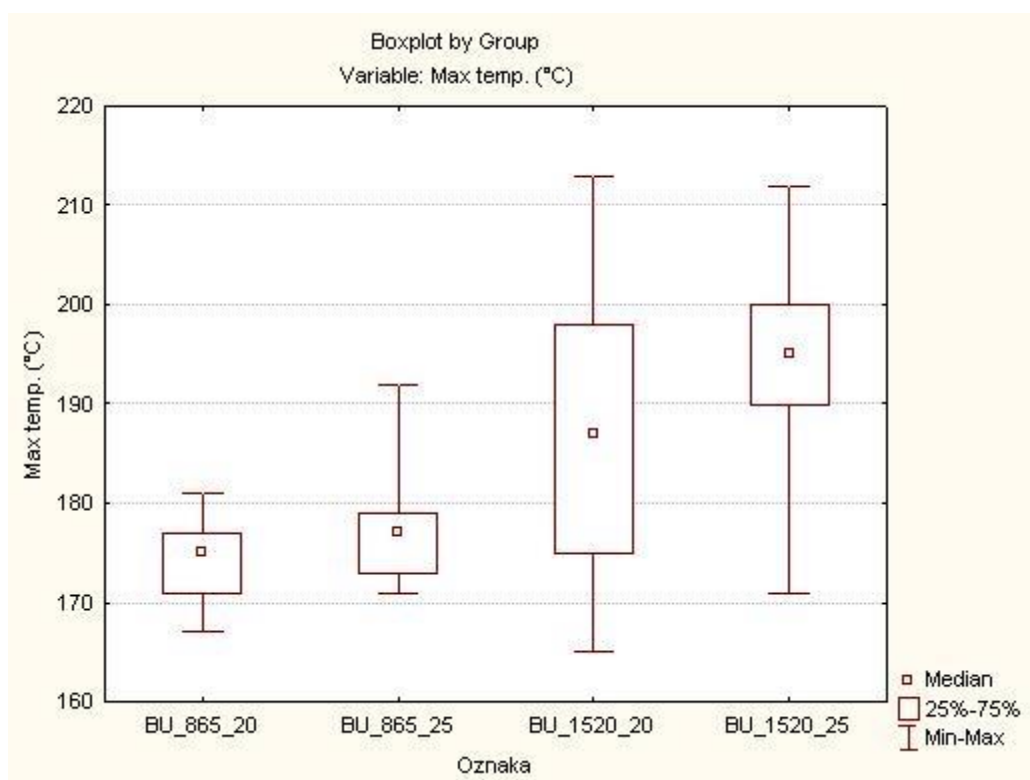
4.5. Usporedba rezultata iznosa temperature zavarivanja uzoraka bukovine

Nakon provedenog ispitivanja, provedena je statistička analiza temperatura zavarivanja kod uzoraka bukovine.

Tablica 9. Rezultati temperature zavarivanja statističke obrade uzoraka borovine

Breakdown Table of Descriptive Statistics N = 120								
A	B Means	B N	B Std. Dev.	B Minimum	B Maximum	B Q25	B Median	B Q75
BU_865_20	174,1333	30	3,58862	167	181	171	175	177
BU_865_25	176,7667	30	4,24819	171	192	173	177	179
BU_1520_20	186,9667	30	13,41765	165	213	175	187	198
BU_1520_25	194,6667	30	8,76251	171	212	190	195	200
All Grps	183,1333	120	11,74729	165	213	175	179	194
B – Temperatura (°C)								

Iz tablice 9 i slike 31 vidljivo je, kao i kod borovine, kako temperatura ovisi o frekvenciji vrtnje, odnosno višu temperaturu zavarivanja postižu veće frekvencije. Između uzoraka varenih jednakom frekvencijom vrtnje ne postoji statistički značajna razlika, odnosno dubina zavarivanja ne utječe na temperaturu zavarivanja. Međutim, između uzoraka varenih različitim frekvencijama vrtnje postoji statistički značajna razlika. Prosječna temperatura zavarivanja kod frekvencije vrtnje 865 min^{-1} (BU_865_20 i BU_865_25) iznosi oko $175 \text{ }^{\circ}\text{C}$, dok kod frekvencije vrtnje 1520 min^{-1} (BU_1520_20 i BU_1520_25) iznosi oko $190 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

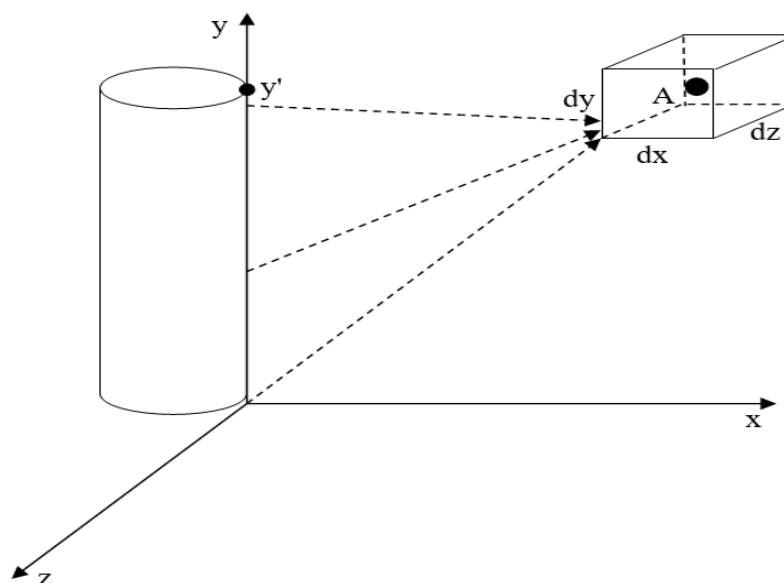


Slika 31. Usporedba temperatura zavarivanja bukovine

5. TEORIJSKO ISTRAŽIVANJE PRIJENOSA TOPLINE

Problematiku prijenosa topline od mjesta zavarivanja do mjerne točke provodili su autori Zoulalian i Pizzi (2007.)³⁶. Međutim navedeni autori su proučavali prijenos topline samo u smjeru uređaja ispitivanja temperature (y osi). Zbog udaljenosti mjesta zavarivanja i mjernog mjesta (u našem slučaju ono iznosi 2 mm) dolazi do pojedinih gubitaka i do prijenosa topline sa drugih osi (x i z osi) na mjerno mjesto, iz tog razloga izrađen je model prijenosa topline uzimajući u obzir utjecaj svih osi.

Proces zavarivanja drva prikazan je u trodimenzionalnom pravokutnom koordinatnom sustavu u kojem se zavarivanje vrši duž y osi (Slika 32.). Tijekom procesa moždanik je u dinamičkom kontaktu sa svim točkama na y osi za koje vrijedi $0 \leq y \leq y'$, zbog čega te točke postaju izvori topline. Obzirom da su vremenski intervali u kojima je moždanik u kontaktu sa svakom pojedinom točkom na y osi različiti, različiti su i intenziteti tih toplinskih izvora. Cilj ovog dijela diplomskog rada je postaviti jednadžbu koja opisuje izvor i prijenos topline do točke A u kojoj se mjeri temperatura (Slika 33.)



Slika 32. Zavarivanje drva u trodimenzionalnom pravokutnom koordinatnom sustavu. A – točka u kojoj se mjeri temperatura

³⁶ Zoulalian, A., Pizzi, A., 2007: Wood-dowel rotation welding – a heat – transfer model. J. Adhesion Sci. Technol., 21 (2) 97-108

Oko točke A izoliramo infinitesimalni volumen $dV = dx \cdot dy \cdot dz$, gdje su dx , dy i dz dimenzije stranica infinitesimalnog volumena. Prema prvom zakonu termodinamike promjena unutarnje energije označenog volumena je:

$$dU = \delta Q_u - \delta W. \quad (1)$$

Gdje je: δQ_u – ukupna toplina toplina,

δW – izvršeni rad.

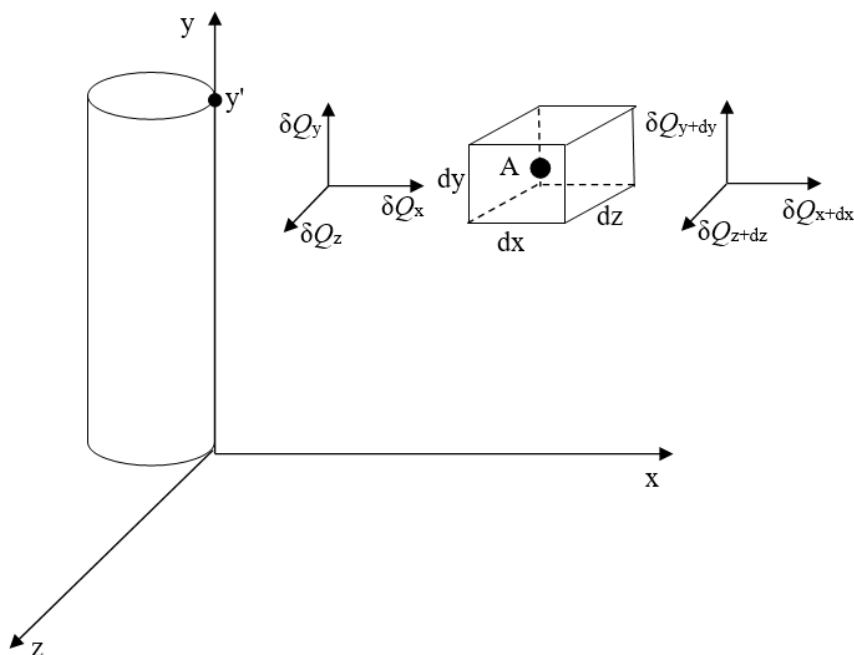
Rad se može vršiti u slučaju da promatrani medij mijenja svoj volumen, a obzirom da u danom temperaturnom rasponu drvo ne mijenja značajno svoj volumen, izvršeni rad se može zanemariti.

Nakon zanemarivanja izvršenog rada slijedi:

$$dU = \delta Q_u. \quad (2)$$

Prema jednadžbi (2) promjena unutarnje energije promatranog volumena jednaka je ukupnoj promjeni topline tog volumena koja se može zapisati kao razlika dovedene ($\delta Q_{dov.}$) i odvedene ($\delta Q_{odv.}$) topline i topline izvora ($\delta Q_{izv.}$):

$$dQ_u = \delta Q_{dov.} - \delta Q_{odv.} + \delta Q_{izv.} \quad (3)$$



Slika 33. Zavarivanje drva u trodimenzionalnom pravokutnom koordinatnom sustavu. A – točka u kojoj se mjeri temperatura

$$\delta Q_{dov.} = \delta Q_x + \delta Q_y + \delta Q_z . \quad (4)$$

$$\delta Q_{odv.} = \delta Q_{x+dx} + \delta Q_{y+dy} + \delta Q_{z+dz} . \quad (5)$$

Općenito, toplina se može definirati preko gustoće toplinskog toka:

$$\delta Q = q \cdot dS \cdot dt . \quad (6)$$

Gdje je: q – gustoća toplinskog toka,

dS – površina kroz koju se promatra toplinski tok,

dt – vremenski interval.

Analogno jednadžbi (6), dovedenu toplinu možemo zapisati u ovisnosti o osima trodimenzionalnog koordinatnog sustava:

$$\delta Q_x = q_x \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (7)$$

$$\delta Q_y = q_y \cdot dx \cdot dz \cdot dt \quad (8)$$

$$\delta Q_z = q_z \cdot dx \cdot dy \cdot dt \quad (9)$$

Odvedena toplina zapisana u ovisnosti o osima trodimenzionalnog koordinatnog sustava:

$$\delta Q_{x+dx} = q_{x+dx} \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (10)$$

$$\delta Q_{y+dy} = q_{y+dy} \cdot dx \cdot dz \cdot dt \quad (11)$$

$$\delta Q_{z+dz} = q_{z+dz} \cdot dx \cdot dy \cdot dt \quad (12)$$

Odvedeni toplinski tokovi q_{x+dx} , q_{y+dy} i q_{z+dz} mogu se razviti u Taylorov red:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\delta q_x}{\delta x} dx + \frac{1}{2!} \cdot \frac{\delta^2 q_x}{\delta x^2} dx^2 + \frac{1}{3!} \cdot \frac{\delta^3 q_x}{\delta x^3} dx^3 + \dots + \frac{1}{n!} \cdot \frac{\delta^n q_x}{\delta x^n} dx^n \quad (13)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\delta q_y}{\delta y} dy + \frac{1}{2!} \cdot \frac{\delta^2 q_y}{\delta y^2} dy^2 + \frac{1}{3!} \cdot \frac{\delta^3 q_y}{\delta y^3} dy^3 + \dots + \frac{1}{n!} \cdot \frac{\delta^n q_y}{\delta y^n} dy^n \quad (14)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\delta q_z}{\delta z} dz + \frac{1}{2!} \cdot \frac{\delta^2 q_z}{\delta z^2} dz^2 + \frac{1}{3!} \cdot \frac{\delta^3 q_z}{\delta z^3} dz^3 + \dots + \frac{1}{n!} \cdot \frac{\delta^n q_z}{\delta z^n} dz^n \quad (15)$$

Zanemarivanjem viših redova derivacija slijedi:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\delta q_x}{\delta x} dx \quad (16)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\delta q_y}{\delta y} dy \quad (17)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\delta q_z}{\delta z} dz \quad (18)$$

Kombinacijom jednačbi (7) - (18) može se odrediti razlika dovedene i odvedene topline u ovisnosti o koordinatnoj osi:

$$\begin{aligned} dQ_x - dQ_{x+dx} &= q_x \cdot dy \cdot dz \cdot dt - q_{x+dx} \cdot dy \cdot dz \cdot dt = \\ &= q_x \cdot dy \cdot dz \cdot dt - \left(q_x + \frac{\delta q_x}{\delta x} dx \right) \cdot dy \cdot dz \cdot dt = \\ &= - \frac{\delta q_x}{\delta x} dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \end{aligned} \quad (19)$$

Analogno za y smjer:

$$\begin{aligned} dQ_y - dQ_{y+dy} &= q_y \cdot dx \cdot dz \cdot dt - q_{y+dy} \cdot dx \cdot dz \cdot dt = \\ &= q_y \cdot dx \cdot dz \cdot dt - \left(q_y + \frac{\delta q_y}{\delta y} dy \right) \cdot dx \cdot dz \cdot dt = \\ &= - \frac{\delta q_y}{\delta y} dy \cdot dx \cdot dz \cdot dt \end{aligned} \quad (20)$$

i z smjer

$$\begin{aligned} dQ_z - dQ_{z+dz} &= q_z \cdot dx \cdot dy \cdot dt - q_{z+dz} \cdot dx \cdot dy \cdot dt = \\ &= q_z \cdot dx \cdot dy \cdot dt - \left(q_z + \frac{\delta q_z}{\delta z} dz \right) \cdot dx \cdot dy \cdot dt = \\ &= - \frac{\delta q_z}{\delta z} dz \cdot dx \cdot dy \cdot dt \end{aligned} \quad (21)$$

Izraz za ukupnu toplinu:

$$\begin{aligned}
 dQ_u &= \delta Q_{dov.} - \delta Q_{odv.} = \\
 &= -\frac{\delta q_x}{\delta x} dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt - \frac{\delta q_y}{\delta y} dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt - \frac{\delta q_z}{\delta z} dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt = \\
 &= dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \cdot \left(-\frac{\delta q_x}{\delta x} - \frac{\delta q_y}{\delta y} - \frac{\delta q_z}{\delta z} \right)
 \end{aligned} \quad (22)$$

Toplina ($dQ_{izv.}$) koju daje izvor smješten duž y osi može se definirati pomoću toplinskog toka izvora ($\phi_{izv.}$)

$$dQ_{izv.} = \phi_{izv.} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (23)$$

Promjena unutarnje energije u jednadžbi (2) može se definirati na sljedeći način:

$$dU = dm \cdot c \cdot d\theta \quad (24)$$

Gdje j: dm – promjena mase,

c – specifični toplinski kapacitet,

$d\theta$ – promjena temperature.

Promjena mase može se definirati pomoću gustoće:

$$dm = \rho \cdot dV = \rho \cdot dx \cdot dy \cdot dz \quad (25)$$

Uvrštavanjem izraza (25) u (24) slijedi:

$$dU = \rho \cdot c \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\theta \quad (26)$$

Uvrštavanjem izraza (22), (23) i (26) u izraz (3) slijedi:

$$\rho \cdot c \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\theta = dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \cdot \left(-\frac{\delta q_x}{\delta x} - \frac{\delta q_y}{\delta y} - \frac{\delta q_z}{\delta z} \right) + \phi_{izv.} \cdot dx \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (27)$$

Nakon skraćivanja:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{d\theta}{dt} = -\frac{\delta q_x}{\delta x} - \frac{\delta q_y}{\delta y} - \frac{\delta q_z}{\delta z} + \phi_{izv.} \quad (24)$$

Gustoća toplinskog toka može se definirati pomoću koeficijenta toplinske vodljivosti (λ) na sljedeći način:

$$q_x = \lambda_x \cdot \frac{\delta Q_x}{dx} \quad (25)$$

$$q_y = \lambda_y \cdot \frac{\delta Q_y}{dy} \quad (26)$$

$$q_z = \lambda_z \cdot \frac{\delta Q_z}{dz} \quad (27)$$

Uvrštavanjem izraza (25), (26) i (27) u izraz (24) slijedi:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{d\theta}{dt} = -\frac{\delta}{\delta x} \left(\lambda_x \cdot \frac{\delta Q_x}{dx} \right) - \frac{\delta q_y}{\delta y} \left(\lambda_y \cdot \frac{\delta Q_y}{dy} \right) - \frac{\delta q_z}{\delta z} \left(\lambda_z \cdot \frac{\delta Q_z}{dz} \right) + \phi_{izv.} \quad (28)$$

Odnosno:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{d\theta}{dt} = -\frac{\delta \lambda_x}{\delta x} \cdot \frac{\delta Q_x}{dx} - \lambda_x \cdot \frac{\delta^2 Q_x}{dx^2} - \frac{\delta \lambda_y}{\delta y} \cdot \frac{\delta Q_y}{dy} - \lambda_y \cdot \frac{\delta^2 Q_y}{dy^2} + \phi_{izv.} \quad (29)$$

Zanemarivanjem promjene koeficijenata toplinske vodljivosti duž koordinatnih osi ($\frac{\delta\lambda_x}{\delta x}, \frac{\delta\lambda_y}{\delta y}, \frac{\delta\lambda_z}{\delta z} = 0$) slijedi:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\lambda_x}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\delta^2 Q_x}{dx^2} - \frac{\lambda_y}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\delta^2 Q_y}{dy^2} - \frac{\lambda_z}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\delta^2 Q_z}{dz^2} + \frac{\phi_{izv.}}{\rho \cdot c} \quad (30)$$

Iz izraza (30) zaključuje se da je temperatura izmjerena u točki A ovisna o vremenu ($\frac{d\theta}{dt}$), intenzitetu toplinskog izvora ($\frac{\phi_{izv.}}{\rho \cdot c}$) i sposobnosti materijal da prenese toplinsku energiju od izvora do mjernog mjesta ($-\frac{\lambda_x}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\delta^2 Q_x}{dx^2} - \frac{\lambda_y}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\delta^2 Q_y}{dy^2} - \frac{\lambda_z}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\delta^2 Q_z}{dz^2}$).

Navedni model prikazuje dobar uvod u navedenu problematiku nadograđujući model prijenosa topline autora Zoulalian i Pizzi (2007.)³⁷ koji u sebi sadrži utjecaj i z osi na mjerno mjesto. Izvedena jednadžba nam prikazuje koji sve faktori utječu na izmjerenu temperaturu.

³⁷ Zoulalian, A., Pizzi, A., 2007: Wood-dowel rotation welding – a heat – transfer model. J. Adhesion Sci. Technol., 21 (2) 97-108

6. ZAKLJUČAK

Pregledom dosadašnjih istraživanja dobiven je uvid u tematiku zavarivanja drva i utjecaje parametara zavarivanja na čvrstoću. Zavarivanje se aktivno istražuje proteklih trinaest godina. Međutim, zavarivanje drva nažalost nije našlo primjenu u proizvodnji namještaja i dijelova za namještaj. Zbog svoje najvećih prednosti, ekološke prihvatljivosti i jednostavnosti metode spajanja, u budućnosti se smatra kako će ovaj način spajanja biti uvelike prihvaćen.

U ovom radu istraživao je utjecaj temperature na čvrstoću kod rotacijskog zavarivanja bukovog glatkog moždanika u podlogu borovine (*Pinus Silvestris* L.) i bukovine (*Fagus Sylvatica* L.). Uzorci su prije i nakon zavarivanja kondicionirani u kontroliranim uvjetima (temperatura 23 ± 2 °C i relativna vlaga zraka $55 \pm 5\%$).

Istraživanje je pokazalo kako vrijednosti izvlačnih sila (čvrstoća spoja) ovise o temperaturi, potvrđujući istraživanja Kanazawa i dr. (2005.)³⁸ i Rodriguez i dr. (2010)³⁹.

Statističkom analizom utvrđeno je kako uzorci borovine zavareni većom frekvencijom vrtnje (1520 min^{-1}) postižu prosječno veće iznose izvlačne sile, dok kod bukovine između skupina ne postoji statistički značajne razlike što se pripisuje grešci kod uređaja za zavarivanje. Utvrđena je statistički značajna razlika između BO_865_20 s BO_1520_25, dok ne postoji statistički značajna razlika s BO_865_25 i BO_1520_20. Nadalje uzorci BO_865_25 se značajno razlikuju s BO_1520_25, dok ne postoji statistički značajna razlika s BO_1520_20. Između uzoraka BO_1520_20 i BO_1520_25 ne postoji statistički značajna razlika.

Statističkom analizom utvrđeno je kako temperatura ovisi o frekvenciji vrtnje, odnosno veće iznose temperature postižu uzorci zavareni frekvencijom 1520 min^{-1} u odnosu na uzorke frekvencije vrtnje od 865 min^{-1} . Utvrđeno je kako ne postoji statistički značajna razlika u temperaturi između uzoraka iste frekvencije bez obzira na dubinu. Međutim, postoji statistički značajna razlika između uzoraka različitih frekvencije.

Maksimalna temperatura kod uzoraka borovine frekvencije vrtnje 1520 min^{-1} (BO_1520_20 i BO_1520_25) iznosi oko 220 °C, dok kod uzoraka frekvencije vrtnje 865 min^{-1} (BO_865_20 i BO_865_25) iznosi oko 180 °C. Prosječni iznosi temperatura zavarivanja kod 865 min^{-1} neovisno o dubina zavarivanja iznosi oko 143 °C, dok kod 1520 min^{-1} iznosi 189 °C.

Maksimalna temperatura zavarivanja uzoraka bukovine kod frekvencije vrtnje 865 min^{-1} (BU_865_20 i BU_865_25) iznosi oko 210 °C, dok kod frekvencije vrtnje 1520 min^{-1} (BU_1520_20 i BU_1520_25) iznosi oko 187 °C. Prosječni iznosi

³⁸ Kanazawa, F.; Pazzi, A.; Properzi, M.; Delmotte, L.; Pichelin, F. 2005: Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation, J Adhesion Sci. Technol., 19 (12): 1025 – 1038

³⁹ Rodriguez, G., Diouf, P., Blanchet, P., Stevanovic, T. 2010.: Wood – Dowel Bonding by High-Speed Rotation Welding – Application to Two Canadian Hardwood Species. J Adhesion Sci. Technol., 24 (2010): 1423 – 1436

temperatura zavarivanja kod 865 min^{-1} oko $175 \text{ }^{\circ}\text{C}$, dok kod 1520 min^{-1} iznosi $190 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Izrađen je model prijenosa topline u svrhu dobivanja točnijih rezultata temperatura zavarivanja kako bi se anulirali vrijeme, intenzitet toplinskog izvora i sposobnost materijala da prenese toplinsku energiju od izvora do mjernog mjesta.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{\lambda_x}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\delta^2 Q_x}{dx^2} - \frac{\lambda_y}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\delta^2 Q_y}{dy^2} - \frac{\lambda_z}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\delta^2 Q_z}{dz^2} + \frac{\phi_{izv.}}{\rho \cdot c}$$

7. PRILOZI

7.1. Usporedba rezultata izvlačne sile uzoraka borovine (statistička obrada)

Tablica 10 Deskriptivna statistika izvlačne sile zavarivanja uzoraka borovine

Breakdown Table of Descriptive Statistics					
N = 120					
A	B Means	B N	B Std. Dev.	B Minimum	B Maximum
BO_865_20	1126,343	30	708,3986	248,8	2871,3
BO_865_25	1463,787	30	703,2149	660,6	3863
BO_1520_20	1631,83	30	550,0517	847,7	2925,3
BO_1520_25	1986,703	30	773,9805	93,6	3256,6
All Grps	1552,166	120	747,9354	93,6	3863
B – izvlačna sila (N)					

Tablica 11 Testiranje homogenosti varijance izvlačne sile skupina borovine

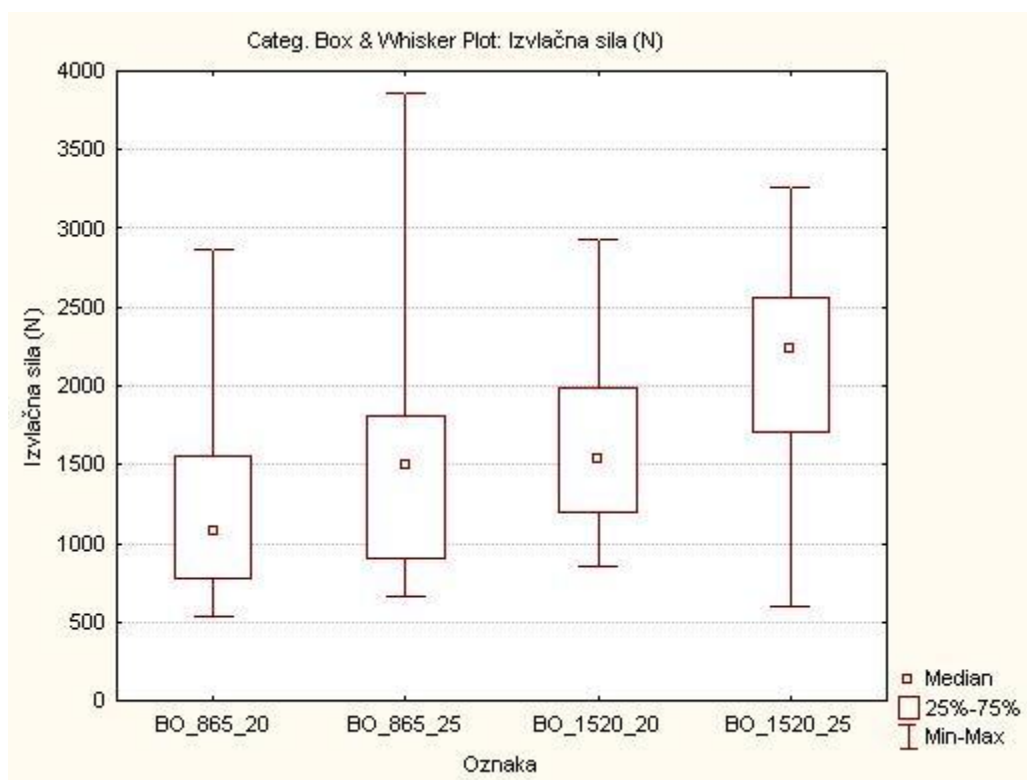
Variable	Levene Test of Homogeneity of Variances							
	Marked effects are significant at $p < 0,05000$							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
Izvlačna sila (N)	205423,6	3	68474,53	16444640	109	150868,3	0,45387	0,71509

Tablica 12. Analiza homogenosti izvlačne sile skupina borovine

Variable	Analysis of Variance							
	Marked effects are significant at $p < ,05000$							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
Izvlačna sila (N)	10490846	3	3496949	45334891	109	415916,4	8,407815	0,000045

Tablica 13 Višestruki post hoc test izvlačnih sila skupina borovine

A	Scheffe Test; Variable: B			
	Marked differences are significant at $p < ,05000$			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=1272,1	M=1463,8	M=1631,8	M=2110,4
BO_865_20		0,752272	0,242643	0,000141
BO_865_25	0,752272		0,796819	0,003301
BO_1520_20	0,242643	0,796819		0,051892
BO_1520_25	0,000141	0,003301	0,051892	



Slika 34. Usporedba izvlačnih sila skupina borovine

7.2. Uspredba rezultata iznosa temperature zavarivanja uzoraka borovine (statistička obrada)

Tablica 14. Deskriptivna statistika temperature zavarivanja uzoraka borovine

Breakdown Table of Descriptive Statistics N = 120									
A	B Means	B N	B Std. Dev.	B Variance	B Minimum	B Maximum	B Q25	B Median	B Q75
BO_865_20	141,4	30	29,76181	885,766	66	179	112	152,5	165
BO_865_25	145,6	30	28,7817	828,386	49	178	131	156	165
BO_1520_20	190,0667	30	10,96368	120,202	167	217	181	191,5	199
BO_1520_25	187,2667	30	17,16037	294,478	158	222	174	187	201
All Grps	166,0833	120	32,19154	1036,296	49	222	155,5	169,5	190
B – Temperatura (°C)									

Tablica 15 Testiranje homogenosti varijance temperature zavarivanja skupina borovine

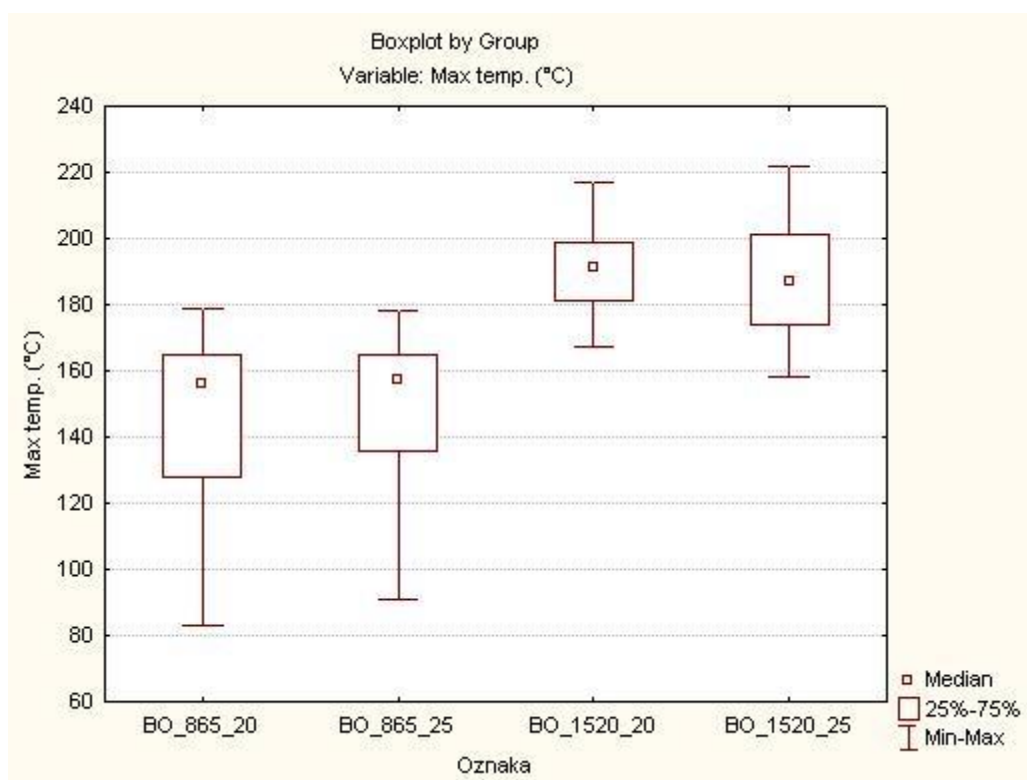
Variable	Levene Test of Homogeneity of Variances Marked effects are significant at $p < 0,05000$							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
Temperatura (°C)	4621,238	3	1540,413	20089,05	116	173,1814	8,894791	0,000024

Tablica 16 Višestruka usporedba (Kruskal - Wallis test) temperatura zavarivanja skupina borovine

Depend.: Max. Temp. (°C)	Multiple Comparisons p values (2-tailed)			
	Independent (grouping) variable: Oznaka			
	Kruskal-Wallis test: $H(3, N=120)=78,92055$ $p=,0000$			
	BO_865_20	BO_865_25	BO_1520_20	BO_1520_20
	R:31,267	R:33,533	R:91,85	R:85,35
BO_865_20		1	0	0
BO_865_25	1		0	0
BO_1520_20	0	0		1
BO_1520_20	0	0	1	

Tablica 17 Višestruki post hoc test temperatura zavarivanja skupina bukovine

A	Scheffe Test; Variable: B			
	Marked differences are significant at $p < ,05000$			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=141,4	M=145,6	M=190,07	M=187,27
BO_865_20		0,919278	0	0
BO_865_25	0,919278		0	0
BO_1520_20	0	0		0,974012
BO_1520_25	0	0	0,974012	



Slika 35. Usporedba temperature zavarivanja skupina borovine

7.3. Usporedba rezultata izvlačne sile uzoraka bukovine (statistička obrada)

Tablica 18 Rezultati izvlačne sile statističke obrade uzoraka bukovine

Breakdown Table of Descriptive Statistics N = 120					
A	B Means	B N	B Std. Dev.	B Minimum	B Maximum
BU_865_20	2543,563	30	792,8169	1125,2	4498,7
BU_865_25	2857,021	29	937,9816	1102,1	4724
BU_1520_20	2686,927	30	631,8067	1357,5	3711,7
BU_1520_25	2676,443	30	783,0139	1579,1	4520,9
All Grps	2689,593	119	790,18	1102,1	4724
B – izvlačna sila (N)					

Tablica 19 Testiranje homogenosti varijance izvlačne sile skupina bukovine

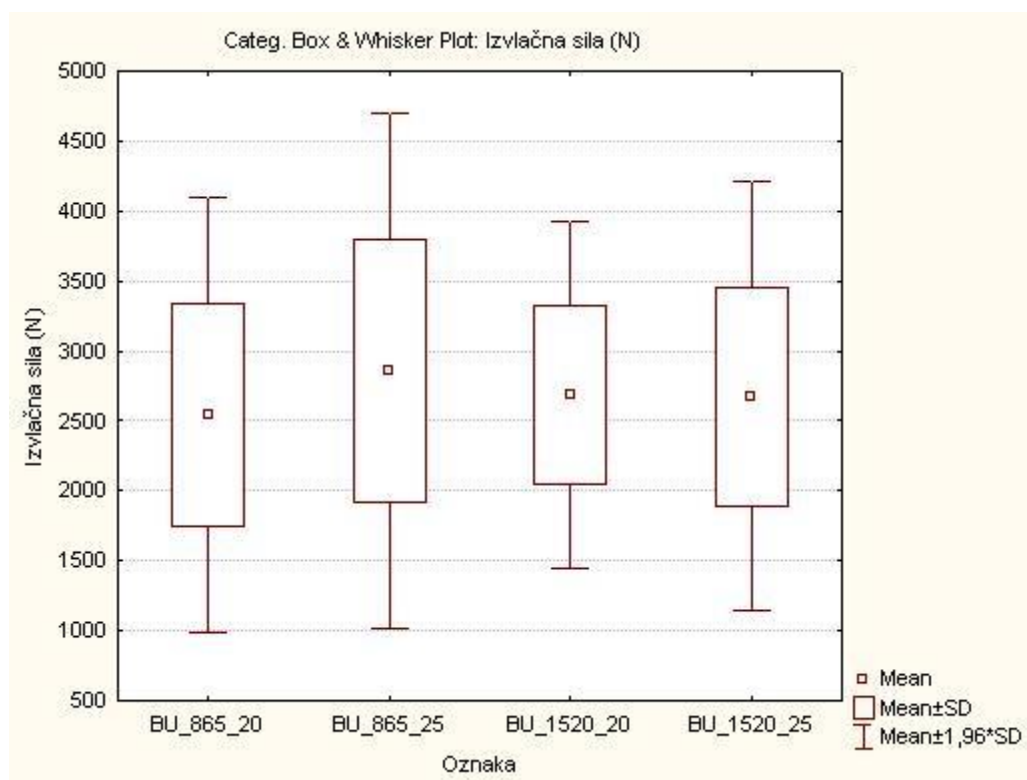
Variable	Levene Test of Homogeneity of Variances Marked effects are significant at $p < 0,05000$							
	SS	df	MS	SS	df	MS	F	p
	Effect	Effect	Effect	Error	Effor	Effor		
Izvlačna sila (N)	1039053	3	346351,1	20283191	115	176375,6	1,963713	0,123353

Tablica 20 Analiza homogenosti izvlačne sile skupina bukovine

Variable	Analysis of Variance Marked effects are significant at $p < ,05000$							
	SS	df	MS	SS	df	MS	F	p
	Effect	Effect	Effect	Error	Effor	Effor		
Izvlačna sila (N)	1458070	3	486023,2	72219286	115	627993,8	0,77393	0,510875

Tablica 21 Višestruki post hoc test izvlačnih sila skupina bukovine

A	Scheffe Test; Variable: B			
	Marked differences are significant at $p < ,05000$			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=2543,6	M=2857,0	M=2686,9	M=2676,4
BU_865_20		0,513642	0,920646	0,935493
BU_865_25	0,513642		0,877833	0,857478
BU_1520_20	0,920646	0,877833		0,999964
BU_1520_25	0,935493	0,857478	0,999964	



Slika 36. Usporedba izvlačnih sila skupina bukovine

7.4. Uspredba rezultata iznosa temperature zavarivanja uzoraka bukovine (statistička obrada)

Tablica 22 Rezultati temperature zavarivanja statističke obrade uzoraka borovine

Breakdown Table of Descriptive Statistics N = 120									
A	B Means	B N	B Std. Dev.	B Variance	B Minimum	B Maximum	B Q25	B Median	B Q75
BU_865_20	174,1333	30	3,58862	12,8782	167	181	171	175	177
BU_865_25	176,7667	30	4,24819	18,0471	171	192	173	177	179
BU_1520_20	186,9667	30	13,41765	180,0333	165	213	175	187	198
BU_1520_25	194,6667	30	8,76251	76,7816	171	212	190	195	200
All Grps	183,1333	120	11,74729	137,9989	165	213	175	179	194
B – Temperatura (°C)									

Tablica 23 Testiranje homogenosti varijance temperature zavarivanja skupina bukovine

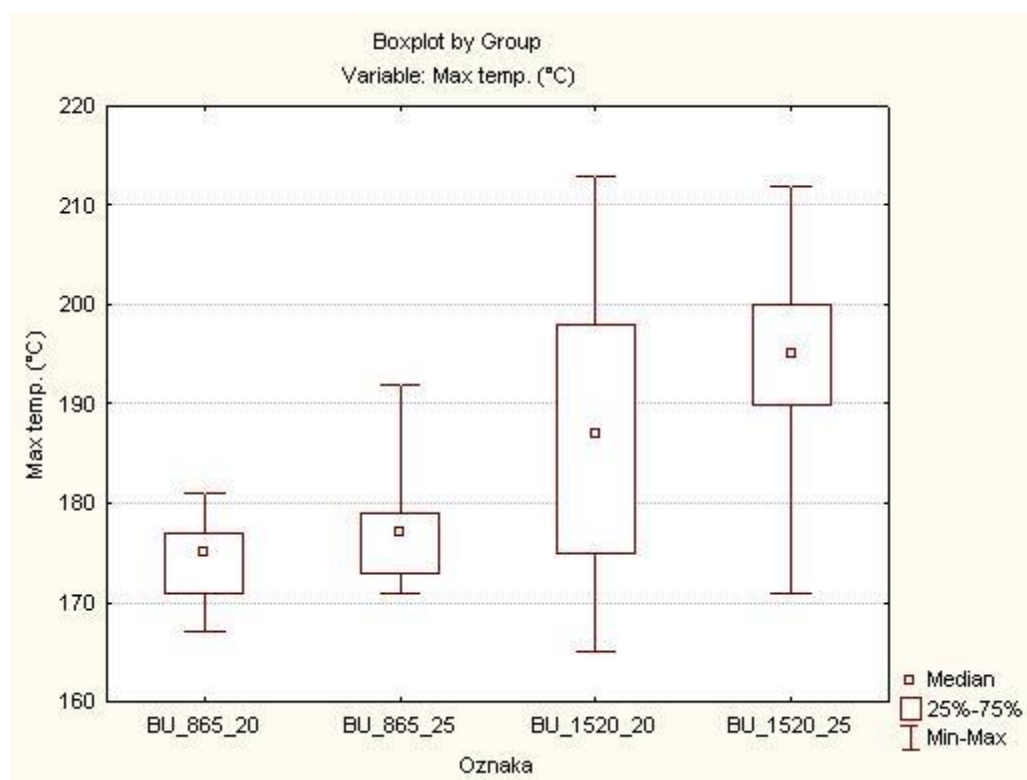
Variable	Levene Test of Homogeneity of Variances Marked effects are significant at $p < 0,05000$							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
Temperatura (°C)	1452,672	3	484,224	2551,771	116	21,99803	22,01216	0

Tablica 24 Višestruka usporedba (Kruskal - Wallis test) temperatura zavarivanja skupina borovine

Depend.: Max. Temp. (°C)	Multiple Comparisons p values (2-tailed)			
	Independent (grouping) variable: Oznaka			
	Kruskal-Wallis test: $H(3, N=120)=78,92055$ $p=,0000$			
	BO_865_20	BO_865_25	BO_1520_20	BO_1520_20
	R:33,000	R:45,200	R:70,750	R:93,050
BU_865_20		1	0,000158	0
BU_865_25	1		0,026668	0,000001
BU_1520_20	0,000158	0,026668		0,078192
BU_1520_25	0	0,000001	0,078192	

Tablica 25 Višestruki post hoc test temperatura zavarivanja skupina bukovine

A	Scheffe Test; Variable: B			
	Marked differences are significant at $p < ,0500$			
	{1}	{2}	{3}	{4}
	M=174,13	M=176,77	M=186,97	M=194,67
BU_865_20		0,695439	0,000001	0
BU_865_25	0,695439		0,000172	0
BU_1520_20	0,000001	0,000172		0,008109
BU_1520_25	0	0	0,008109	



Slika 37. Usporedba temperatura zavarivanja bukovine

LITERATURA

1. Auchet, S., Segovia, C., Mansouri, H.R., Meausoone, P.-J., Pizzi, A., Omrani, P. 2010: Accelerating vs Constant Rate of Insertion in Wood Dowel Welding. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 24 (2010) 1319 – 1328
2. Belleville, B., Stevanovic, T., Pizzi, A., Cloutier, A., Blanchet, P. 2012.: Determination of optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species. *J. Adhesion Sci. Technol.*, DOI: 10.1080/01694243.2012.687596
3. Boonstra, M., Pizzi, A., Ganne-Chedeville, C., Properzi, M., Leban, J.M. 2006: Vibration welding of heat-treated wood. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 20 (4): 359 – 369
4. Ganne-Chedeville, C., Properzi, M., Pizzi, A., Leban, J.-M., Pichelin, F. 2007: Edge and face linear vibration welding of wood panels. *Holz Roh Werkst.*, 65:83-85
5. Gfeller, B., Pizzi, A., Zanetti, M., Properzi, M., Pichelin, F., Lehmann, M., Delmotte, L. 2003: Wood bonding by vibrational welding, *J. Adhesion Sci. Technol.* 17, 1573–1589
6. Gfeller, B.; Pizzi, A.; Zanetti, M.; Pichelin, F.; Lehmann, M.; Delmotte, L. 2004: Solid wood joints by in situ welding of structural wood constituents. *Holzforschung*, 58 (1): 45 – 53
7. Gutowski, V., Dodiuk, H. 2013.: Recent Advances in Adhesion Science and Technology. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York
8. Kanazawa, F.; Pazzi, A.; Kanazawa, M.; Delmotte, L.; Pichelin, F. 2005: Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation, *J. Adhesion Sci. Technol.*, 19 (12): 1025 – 1038
9. Leban, J. M.; Mansouri, H. R.; Omrani, P.; Pizzi, A. 2008: Dependence of dowel welding on rotation rate. *Holz Roh Werkst.*, (66): 241 – 242
10. Trajković, J., Despot, R., 1996.: BUKOVINA, *Drvna industrija* 47 (4) 171
11. Omrani, P.; Mansouri, H. R.; Pizzi, A. 2009: Linear welding of grooved wood surfaces. *Eur. J. Wood Prod.*, 67 (4): 479 – 481
12. Petrić, B., Trajković, J., 1996.: OBIČNI BOR, *Drvna industrija* 47 (3) 123
13. Pizzi, A.; Leban, J. M.; Kanazawa, F.; Properzi, M.; Pichelin, F., 2004: Wood dowel bonding by high – speed rotation welding, *J. Adhesion Sci. Technol.*, 18 (11): 1263 – 1278
14. Pizzi, A.; Properzi, M.; Leban, J. M.; Pichelin, F. 2003: Mechanically – induced wood welding. *Maderas. Ciencia y tecnologia*, 5 (2): 101 – 106
15. Pizzi, A., Despres, A., Mansouri, H.R., Leban, J.-M. 2006: Wood joints by through-dowel rotation welding microstructure, ^{13}C -NMR and water resistance. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 20 (5) 427 – 436
16. Resch, L.; Despres, A.; Pizzi, A.; Bocquet, J. F.; Leban, J. M. 2006: Welding-through doweling of wood panels. *Holz als Roh- und Werkstoff* (2006) 64: 423–425

17. Rodriguez, G., Diouf, P., Blanchet, P., Stevanovic, T. 2010.: Wood – Dowel Bonding by High-Speed Rotation Welding – Application to Two Canadian Hardwood Species. *J Adhesion Sci. Technol.*, 24 (2010): 1423 – 1436
18. Stamm, B.; Natterer, J.; Navi, P. 2005: Joining of wood layers by friction welding. *J Adhesion Sci. Technol.*, 19 (13 – 14): 1129 – 1139
19. Sutthoff, B., Franz, U., Hentschel, H., Schaaf, A. 1996.: Verfahren zum reibschweissartigen Fügen und Verbinden von Holz. *Patentschrift DE*, 196(20), 273
20. Zoulalian, A., Pizzi, A., 2007: Wood-dowel rotation welding – a heat – transfer model. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 21 (2) 97-108
21. Župčić, I. 2010.; Čimbenici koji utječu na spajanje tokarenih bukovih elemenata tehnikom zavarivanja. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb
22. Župčić, I., Bogner, A., Grbac, I. 2011.: Vrijeme trajanja zavarivanja kao važan čimbenik zavarivanja bukovine. *Drvna industrija* 62 (2) 115 - 121
23. Župčić, I., Mihulja, G., Bogner, A., Grbac, I., Horvat, B., 2008: Zavarivanje masivnog drva, *Drvna industrija* 59 (3) 113 – 119 (2008)
24. Župčić, I., Mihulja, G., Bogner, A., Grbac, I., 2011: Vrijeme trajanja zavarivanja kao važan čimbenik zavarivanja bukovine, *Drvna industrija*, 62 (2) 115 – 121 (2011)
25. Župčić, I., Vlaović, Z., Domljan, D., Grbac, I. 2014.: Influence of Various Wood Species and Cross-Sections on Strength of a Dowel Welding Joint. *Drvna industrija* 65 (2) 121 – 127